



# **Balıkesir’de Bir Çiftlik Evi İçin Hibrit Yenilenebilir Enerji Sisteminin Tasarımı ve Simülasyonu**

## **Design and Simulation of a Hybrid Renewable Energy System for a Farmhouse in Balıkesir, Turkey**

**Mustafa Eren YILMAZ\_ORCID: 0009-0009-0618-3518,**  
**Zeynel KARADENİZ\_ORCID: 0009-0003-0429-8019,**  
**Batuhan ÖZBİLGİN\_ORCID:0009-0007-1327-1669**

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

### **Özet**

Bu çalışmada, Balıkesir ili Ovaköy Köyü’nde yer alan bir çiftlik evi için şebekeden bağımsız çalışabilen ve enerji fazlasını şebekeye satabilen hibrit bir yenilenebilir enerji sistemi tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında, konut ve tarımsal faaliyetlere ait elektrik yükleri birlikte ele alınmıştır. Günlük elektrik tüketimi ev için 8 kWh, çiftlik faaliyetleri (temizlik ve sulama sistemleri) için ise 2 kWh olmak üzere toplamda yaklaşık 10 kWh olarak belirlenmiştir. Tasarlanan hibrit sistem; fotovoltaik paneller, rüzgâr türbini, biyogaz jeneratörü, akü grubu, inverter/konvertör ve şebeke bağlantısından oluşmaktadır. Biyogaz jeneratörü için günlük 1 ton biyokütle temin edilebildiği kabul edilmiştir. Sistem tasarımı ve optimizasyonu HOMER yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve farklı konfigürasyonlar teknik ve ekonomik açıdan karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları, sistemin yüksek yenilenebilir enerji oranına sahip olduğunu, yüklerin kesintisiz şekilde karşılanabildiğini ve fazla enerjinin şebekeye satılmasıyla ekonomik avantaj sağladığını göstermektedir. Elde edilen bulgular, Ovaköy Köyü gibi tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu kırsal bölgelerde hibrit enerji sistemlerinin sürdürülebilir ve uygulanabilir bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Hibrit yenilenebilir enerji, çiftlik evi, fotovoltaik sistem, biyogaz, rüzgâr enerjisi, enerji simülasyonu

## Abstract

In this study, a hybrid renewable energy system capable of operating in stand-alone mode while exporting surplus electricity to the grid is designed and analyzed for a farmhouse located in Ovaköy Village of Balıkesir Province, Türkiye. The system is designed to meet both residential and agricultural electricity demands. The daily electricity consumption is determined as approximately 10 kWh, consisting of 8 kWh for household use and 2 kWh for farm-related activities such as cleaning and irrigation. The proposed hybrid system includes photovoltaic panels, a wind turbine, a biogas generator, battery storage, an inverter/converter, and a grid connection. A daily biomass availability of 1 ton is assumed for the biogas generator. The system design and optimization are carried out using the HOMER software, and various configurations are evaluated in terms of technical and economic performance. Simulation results indicate that the system achieves a high renewable energy fraction, ensures reliable power supply, and provides economic benefits through surplus energy sales to the grid. The findings demonstrate that hybrid renewable energy systems offer a sustainable and feasible solution for rural agricultural regions such as Ovaköy Village.

**Keywords:** Hybrid renewable energy, farmhouse, photovoltaic system, biogas, wind energy, energy simulation

## 1. Giriş

Enerji ihtiyacının artması, fosil yakıt kaynaklarının sınırlı olması ve çevresel etkiler, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını zorunlu hale getirmiştir. Özellikle kırsal yerleşimlerde yer alan konutlar ve tarımsal işletmeler için enerji arz güvenliği büyük önem taşımaktadır. Bu tür bölgelerde şebeke altyapısının yetersiz olması veya enerji kesintilerinin sık yaşanması, şebekeden bağımsız veya yarı bağımsız enerji sistemlerini ön plana çıkarmaktadır. Bu bağlamda, farklı yenilenebilir enerji kaynaklarının bir arada kullanıldığı hibrit enerji sistemleri, enerji sürekliliği ve sistem güvenilirliği açısından etkili bir çözüm sunmaktadır [1–3].

Hibrit enerji sistemleri; güneş, rüzgâr, biyokütle ve enerji depolama sistemlerinin birlikte çalışması sayesinde yenilenebilir kaynakların süreksizliğini azaltmakta ve yük taleplerini daha dengeli bir şekilde karşılamaktadır. Şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemlerinin konutlar, çiftlik evleri ve kırsal topluluklar için teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilir olduğu gösterilmiştir [1–3].

Fotovoltaik sistemler, hibrit enerji yapılarının temel bileşenlerinden biri olup özellikle çatı üstü uygulamalar sayesinde kırsal yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Çatı üzeri PV sistemlerin enerji üretim potansiyeli, yerleşim yönü, eğim açısı ve mimari tasarım ile doğrudan ilişkilidir. Çatı tipi PV sistemlerin uygun mimari tasarım ile enerji üretiminde önemli artışlar sağlayabileceği ortaya konulmuştur [4]. Bu durum, çiftlik evleri gibi geniş çatı alanına sahip yapıların hibrit enerji sistemleri açısından önemli bir avantaj sunduğunu göstermektedir.

Biyogaz enerjisi, tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu kırsal bölgelerde önemli bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Hayvansal ve tarımsal atıklardan elde edilen biyogaz, jeneratörler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülerek sistemin baz yük ihtiyacını karşılayabilmektedir. Literatürde, biyogaz entegrasyonunun hibrit enerji sistemlerinde enerji sürekliliğini artırdığı ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azalttığı belirtilmektedir [5–7].

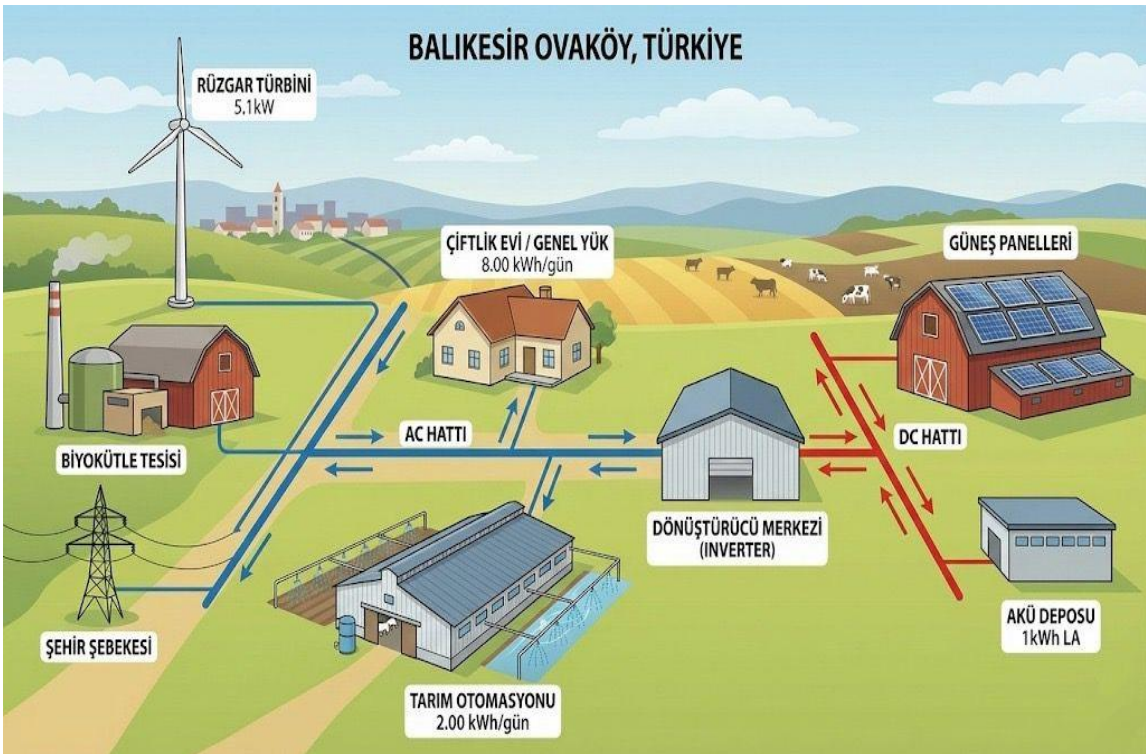
Bu çalışmada, Balıkesir ili Ovaköy Köyü'nde yer alan bir çiftlik evi için fotovoltaik, rüzgâr ve biyogaz kaynaklarına dayalı hibrit bir enerji sistemi tasarlanmıştır. Sistem tasarımı ve optimizasyonu HOMER yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar teknik ve ekonomik açıdan değerlendirilmiştir. Çalışmanın amacı, kırsal

ve tarımsal bölgelerde uygulanabilir, yenilenebilir enerji ağırlıklı ve şebekeye enerji satışı yapabilen bir hibrit sistemin uygulanabilirliğini ortaya koymaktır.

## 2. Sistem Tanıtımı

Bu çalışmada ele alınan hibrit enerji sistemi, Balıkesir ili Ovaköy Köyü'nde yer alan bir çiftlik evi ve buna bağlı tarımsal faaliyetlerin elektrik ihtiyacını karşılamak üzere tasarlanmıştır. Kırsal yerleşim yapısı, tarım ve hayvancılık faaliyetlerinin yaygınlığı ve yenilenebilir enerji kaynakları açısından sahip olduğu potansiyel nedeniyle hibrit enerji sistemleri için uygun bir uygulama alanı sunmaktadır. Bölgede güneşlenme süresinin yeterli olması, rüzgâr potansiyelinin bulunması ve biyokütle kaynaklarının kolay erişilebilir olması, çok kaynaklı enerji sistemlerinin uygulanabilirliğini artırmaktadır [1–3].

Çalışma alanı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanı olarak seçilen Balıkesir ili Ovaköy Köyü.

### 2.1. Elektrik Yük Profili

Sistemin elektrik yükü, konut ve çiftlik faaliyetleri olmak üzere iki ana bileşen altında değerlendirilmiştir. Konut yükü; aydınlatma, beyaz eşyalar ve günlük elektrikli cihaz kullanımını kapsamakta olup günlük ortalama 8 kWh olarak belirlenmiştir. Çiftlik yükü ise temizlik ve sulama sistemlerinden oluşmakta ve günlük yaklaşık 2 kWh elektrik tüketimine sahiptir. Bu doğrultuda sistemin toplam günlük elektrik ihtiyacı yaklaşık 10 kWh olarak hesaplanmıştır.

Yük profili, Ovaköy Köyü'ndeki kırsal yaşam alışkanlıklarını yansıttak şekilde HOMER yazılımına tanımlanmıştır. Kırsal uygulamalarda yüklerin doğru tanımlanması, sistem bileşenlerinin uygun şekilde boyutlandırılması ve ekonomik analizlerin sağlıklı yapılabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır [2,3].

Sisteme tanımlanan günlük elektrik yüküne ait bileşenler Tablo 1'de özetlenmiştir.

**Tablo 1.** Konut ve çiftlik faaliyetlerine ait günlük elektrik yük bileşenleri.

<b>Yük Bileşeni</b>	<b>Günlük Tüketim (kWh/gün)</b>	<b>Açıklama</b>
Konut yükü	8	Aydınlatma, beyaz eşya ve günlük cihazlar
Çiftlik yükü	2	Temizlik ve sulama sistemleri
Toplam	10	Günlük toplam elektrik ihtiyacı

## 2.2. Fotovoltaik Enerji Sistemi

Fotovoltaik (PV) sistem, hibrit yapının ana enerji üretim bileşenlerinden biri olarak tasarlanmıştır. Balıkesir ilinin yıllık ortalama güneşlenme süresi ve küresel güneş radyasyonu değerleri dikkate alınarak PV sistemin enerji üretim potansiyeli HOMER ortamında modellenmiştir. Sistem tasarımında çatı üstü fotovoltaik paneller tercih edilmiştir. Çatı üstü PV uygulamaları, kırsal yapılarda arazi kullanımına ihtiyaç duymaması ve mimari bütünlüğü koruması nedeniyle önemli avantajlar sağlamaktadır. Literatürde, çatı üzeri PV sistemlerin doğru eğim ve yönlendirme ile enerji üretiminde belirgin artışlar sağlayabildiği belirtilmektedir. Arslan ve Türkoğlan tarafından yapılan çalışmada, mimari tasarımın PV üretimi üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiş ve uygun tasarım ile üretim artışı elde edilebileceği gösterilmiştir [4]. Bu doğrultuda PV sistemi, Ovaköy Köyü'nün coğrafi koşullarına uygun şekilde modellenmiştir.

## 2.3. Rüzgâr Enerji Sistemi

Hibrit sistemde, güneş enerjisini tamamlayıcı bir kaynak olarak rüzgâr enerjisinden faydalanılmıştır. Balıkesir ili ve çevresi, özellikle kırsal ve açık alanlarda küçük ölçekli rüzgâr türbinleri için uygun rüzgâr hızlarına sahiptir. Rüzgâr enerjisinin sisteme entegre edilmesi, güneş enerjisinin yetersiz olduğu saatlerde enerji üretimini artırarak sistem güvenilirliğine katkı sağlamaktadır [5,6].

Rüzgâr türbini, üreticiye ait güç eğrisi kullanılarak HOMER yazılımında modellenmiş ve yıllık enerji üretimi simülasyonlar aracılığıyla hesaplanmıştır. Güneş ve rüzgâr kaynaklarının mevsimsel ve günlük bazda birbirini tamamlayıcı özellikleri, hibrit enerji sistemlerinin performansını artırmaktadır.

## 2.4. Biyogaz Jeneratörü

Biyogaz enerjisi, sistemin sürekliliğini sağlayan önemli bir bileşen olarak tasarlanmıştır. Ovaköy Köyü'nde yürütülen tarım ve hayvancılık faaliyetleri kapsamında günlük yaklaşık 1 ton biyokütle temin edilebildiği kabul edilmiştir. Hayvansal ve tarımsal atıklardan elde edilen biyogaz, jeneratör aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülerek özellikle baz yükün karşılanmasında kullanılmıştır.

Biyogaz jeneratörleri, yenilenebilir enerji sistemlerinde güneş ve rüzgar gibi değişken kaynakların süreksizliğini dengeleyen güvenilir bir çözüm sunmaktadır. Literatürde, tarımsal bölgelerde biyogaz entegrasyonunun enerji arz güvenliğini artırdığı ve sistemin yenilenebilir enerji oranını yükselttiği vurgulanmaktadır [6–8].

Biyogaz jeneratörüne ait temel teknik özellikler ve işletme varsayımları Tablo 2'de özetlenmiştir.

**Tablo 2.** Biyogaz jeneratörüne ait temel özellikler ve işletme varsayımları.

Parametre	Değer	Açıklama
Jeneratör gücü	5 kW	Elektrik üretim kapasitesi
Günlük biyokütle	1 ton/gün	Tarım ve hayvansal atık
Kullanım amacı	Baz yük	Süreklilik sağlamak için
Çalışma türü	Sürekli	Yük dengeleme

### 2.5. Enerji Depolama Sistemi

Sistemde enerji depolama amacıyla kurşun-asit akü grubu kullanılmıştır. Akü sistemi, yenilenebilir kaynaklardan üretilen enerjinin yük talebiyle örtüşmediği zamanlarda enerji sürekliliğini sağlamak üzere tasarlanmıştır. HOMER yazılımı, akü kapasitesinin sistem performansı ve maliyet üzerindeki etkilerini detaylı olarak analiz etmeye olanak tanımaktadır.

Kırsal ve şebekeden bağımsız uygulamalarda kurşun-asit aküler, düşük ilk yatırım maliyetleri ve yaygın kullanım alanları nedeniyle tercih edilmektedir [2,5].

### 2.6. İntertör ve Şebeke Bağlantısı

Hibrit sistemde doğru akım (DC) ve alternatif akım (AC) bileşenleri arasında enerji dönüşümünü sağlamak amacıyla invertör/konvertör kullanılmıştır. Ayrıca sistem, yenilenebilir kaynaklardan üretilen fazla enerjinin şebekeye satılabilmesine olanak tanıyacak şekilde şebeke bağlantılı olarak modellenmiştir. Bu yapı, sistemin ekonomik performansını artırmakta ve yenilenebilir enerji kullanımını teşvik etmektedir [1,3]. Tasarlanan hibrit yenilenebilir enerji sistemine ait temel bileşenler ve teknik özellikler Tablo 3'te özetlenmiştir.

**Tablo 3.** Tasarlanan hibrit yenilenebilir enerji sisteminin temel bileşenleri ve teknik özellikleri.

Sistem Bileşeni	Kapasite / Özellik	Açıklama
Fotovoltaik sistem	10 kW	Çatı üstü PV paneller
Rüzgâr türbini	5,1 kW	Küçük ölçekli yatay eksenli türbin
Biyogaz jeneratörü	5 kW	Günlük 1 ton biyokütle kabulü
Akü grubu	8 kWh	Kurşun-asit akü sistemi
İntertör/konvertör	6 kW	AC/DC güç dönüşümü
Şebeke bağlantısı	Var	Enerji fazlasının şebekeye satışı

### 3. Analiz ve Yöntem

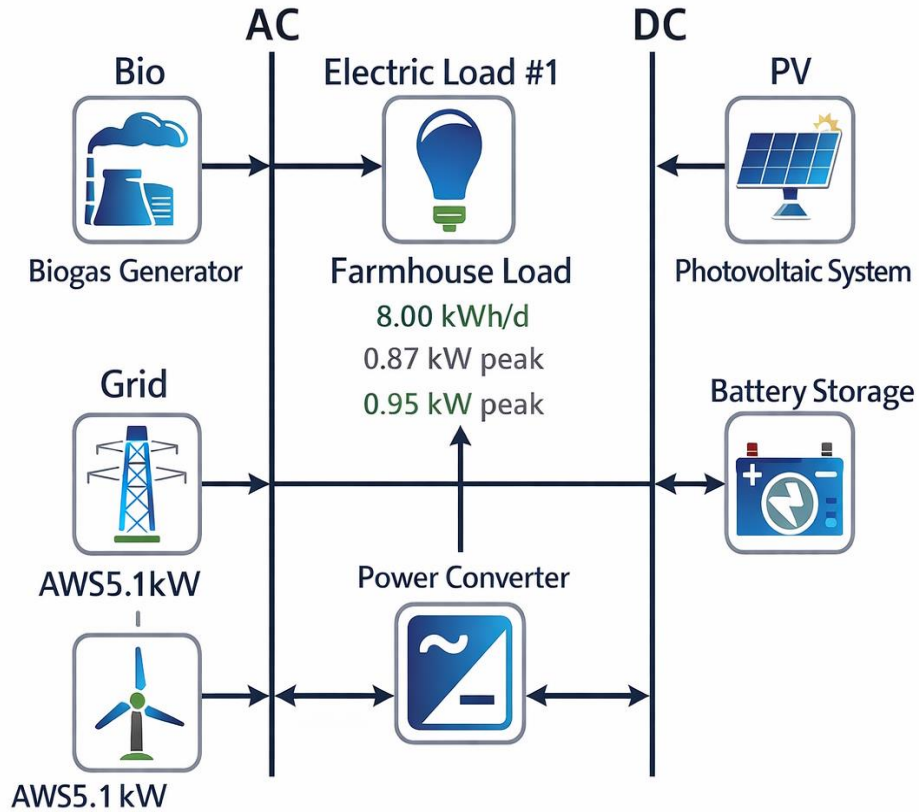
#### 3.1. Genel Analiz Yaklaşımı

Bu çalışmada, Balıkesir’de yer alan bir çiftlik evi için tasarlanan hibrit yenilenebilir enerji sisteminin performansı, saatlik enerji dengesi esasına dayalı simülasyon yaklaşımı ile değerlendirilmiştir. Analiz sürecinde amaç, sistemin yıl boyunca elektrik yükünü kesintisiz karşılayabilmesini sağlayan ve ekonomik açıdan uygun olan sistem konfigürasyonlarının belirlenmesidir. Hibrit enerji sistemlerinin analizinde saatlik simülasyon yöntemlerinin kullanılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken üretim karakteristiğini daha gerçekçi biçimde yansıtmaktadır [1,5].

#### 3.2. Simülasyon Ortamı ve Modelleme Süreci

Sistemin simülasyonu, hibrit ve mikro şebeke tabanlı enerji sistemlerinin analizinde yaygın olarak kullanılan HOMER yazılımı ile gerçekleştirilmiştir [1,5]. Bu kapsamda, 2. bölümde tanıtılan sistem bileşenleri (yük profili, fotovoltaik sistem, rüzgâr türbini, biyogaz jeneratörü, enerji depolama ve güç dönüşüm birimleri) yazılım ortamına tanımlanmıştır. Modelleme aşamasında Balıkesir ili için geçerli güneş ve rüzgâr verileri kullanılmış, sistemin yıl boyunca saatlik bazda enerji üretim ve tüketim dengesi hesaplanmıştır.

Tasarlanan hibrit yenilenebilir enerji sisteminin AC ve DC hatları ile genel mimarisi Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2. Tasarlanan hibrit yenilenebilir enerji sisteminin AC/DC hatları ile genel mimarisi.

### 3.3. Optimizasyon Kriterleri

Simülasyon ve optimizasyon sürecinde temel kriter, sistemin yükleri kesintisiz şekilde karşılaması olarak belirlenmiştir. Bu koşulu sağlayan sistem konfigürasyonları ekonomik performans göstergelerine göre değerlendirilmiştir. Çalışmada Net Bugünkü Maliyet (NPC) ana optimizasyon kriteri olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte Birim Enerji Maliyeti (LCOE) ve yenilenebilir enerji oranı da sistem performansının değerlendirilmesinde dikkate alınmıştır. NPC ve LCOE göstergeleri, hibrit enerji sistemlerinin yaşam döngüsü maliyetlerinin karşılaştırılmasında literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır [1–3].

### 3.4. Senaryo Oluşturma Yaklaşımı

HOMER yazılımı, tanımlanan sistem bileşenlerine ait farklı kapasite kombinasyonlarını analiz ederek çok sayıda alternatif sistem konfigürasyonu üretmiştir. Teknik olarak uygun bulunan konfigürasyonlar arasından, sistem performansını temsil edecek iki temel senaryo seçilmiştir. Bu senaryolar, yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme katkı oranı, yatırım maliyetleri ve işletme maliyetleri açısından farklılık göstermektedir.

### 3.5. Senaryoların Sayısal Değerlendirilmesi

Belirlenen senaryolar, teknik ve ekonomik performans göstergeleri üzerinden karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda her bir senaryo için yıllık enerji dengesi, yenilenebilir enerji oranı, Net Bugünkü Maliyet (NPC) ve Birim Enerji Maliyeti (LCOE) değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, sistemin hangi koşullarda daha avantajlı olduğunu ortaya koymak amacıyla karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

**Tablo 4.** Senaryo 1 ve Senaryo 2’ye ait teknik ve ekonomik performans göstergeleri.

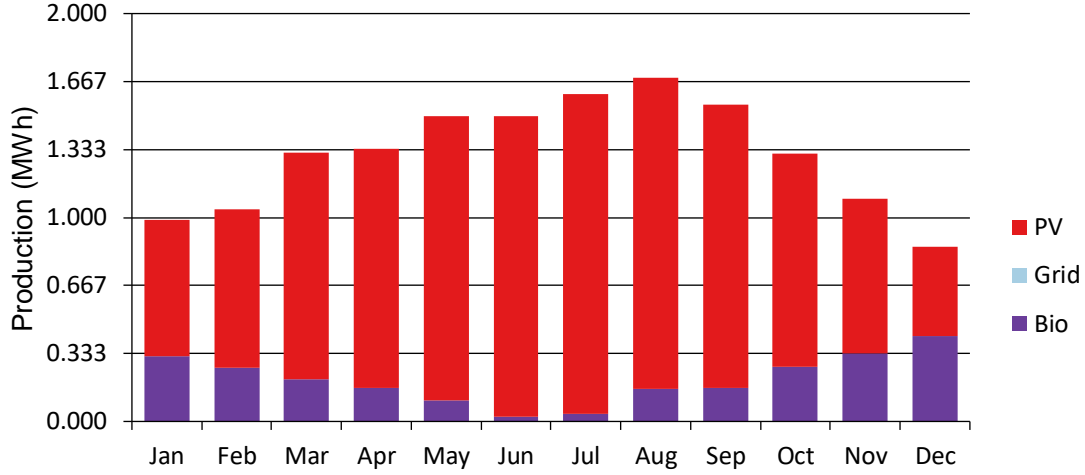
Parametre	Senaryo 1	Senaryo 2
PV gücü (kW)	10	10
Rüzgâr türbini (kW)	–	5,1
Biyogaz jeneratörü (kW)	5	5
Akü kapasitesi (kWh)	8	8
NPC (\$)	31.017	37.715
LCOE (\$/kWh)	0,170	0,117
CAPEX (\$)	27.000	42.000
Yıllık işletme maliyeti (\$/yıl)	310,73	–331,45
Yenilenebilir enerji oranı (%)	100	100

#### 3.5.1 Senaryo 1: PV ve Biyogaz Destekli Şebekeden Bağımsız Hibrit Sistem

Senaryo 1, gerçekleştirilen optimizasyon sonuçlarına göre en düşük Net Bugünkü Maliyet (NPC) değerine sahip sistem konfigürasyonu olarak belirlenmiştir. Bu senaryoda sistem tamamen şebekeden bağımsız olarak çalışmakta ve enerji üretimi yalnızca yerel yenilenebilir kaynaklardan sağlanmaktadır. Sistem; 10 kW kurulu güce sahip fotovoltaik paneller, 5 kW kapasiteli biyogaz jeneratörü, 8 kWh kapasiteli akü grubu ve 6 kW

gücünde bir konvertörden oluşmaktadır. Bu senaryoda rüzgâr türbini ve şebeke bağlantısı bulunmamaktadır.

Senaryo 1 kapsamında hibrit enerji sisteminde aylık bazda gerçekleşen elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. Senaryo 1 kapsamında hibrit yenilenebilir enerji sisteminde aylara göre enerji üretiminin kaynaklara göre dağılımı.

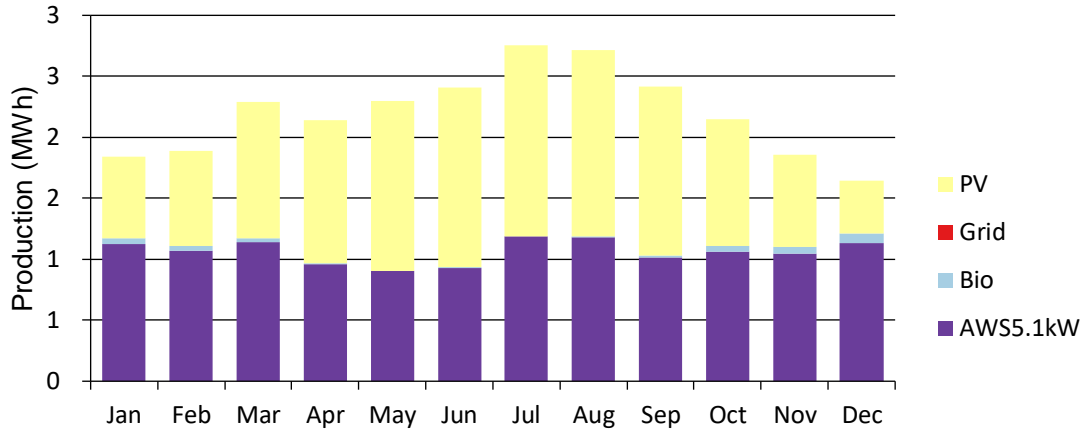
Ekonomik analiz sonuçlarına göre Senaryo 1 için hesaplanan Net Bugünkü Maliyet (NPC) değeri 31.017 \$ olarak belirlenmiştir. Sistemin birim enerji maliyeti (LCOE) 0,170 \$/kWh seviyesindedir. İlk yatırım maliyeti (CAPEX) 27.000 \$ olarak hesaplanmış olup, sistemin yıllık işletme maliyeti 310,73 \$/yıl düzeyindedir. Yenilenebilir enerji oranının %100 olması, sistemin tüm elektrik ihtiyacını yenilenebilir ve yerel kaynaklardan karşıladığını göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar, Senaryo 1'in düşük ilk yatırım maliyeti ve düşük toplam yaşam döngüsü maliyeti sayesinde ekonomik açıdan avantajlı bir yapı sunduğunu ortaya koymaktadır. Enerji üretiminin tamamının yenilenebilir kaynaklardan sağlanması ve sistemin şebekeden tamamen bağımsız çalışması, bu senaryoyu özellikle kırsal ve tarımsal uygulamalar için uygun bir seçenek hâline getirmektedir.

### 3.5.2 Senaryo 2: PV–Rüzgâr–Biyogaz Entegreli Hibrit Sistem

Senaryo 2'de, Senaryo 1'de yer alan fotovoltaik ve biyogaz sistemlerine ek olarak 5,1 kW kapasiteli bir rüzgâr türbini sisteme dâhil edilmiştir. Bu ilave ile birlikte yenilenebilir enerji kaynak çeşitliliği artırılmış ve sistemin enerji üretim sürekliliğinin güçlendirilmesi hedeflenmiştir. Temel sistem bileşenleri büyük ölçüde Senaryo 1 ile benzer olmakla birlikte, rüzgâr enerjisinin entegrasyonu sistemin üretim yapısını daha esnek hâle getirmiştir.

Senaryo 2 kapsamında hibrit enerji sisteminin aylık bazda enerji üretiminin kaynaklara göre dağılımı Şekil 4'te sunulmuştur.



**Şekil 4.** Senaryo 2 kapsamında hibrit yenilenebilir enerji sisteminde aylara göre enerji üretiminin kaynaklara göre dağılımı.

Bu senaryo için yapılan ekonomik analiz sonucunda Net Bugünkü Maliyet (NPC) değeri 37.715 \$ olarak hesaplanmıştır. Birim enerji maliyeti (LCOE) 0,117 \$/kWh olup Senaryo 1'e kıyasla daha düşük bir değer sunmaktadır. Sistemin ilk yatırım maliyeti (CAPEX) 42.000 \$ seviyesinde gerçekleşmiştir. Bir diğer sonuç ise yıllık işletme maliyetinin – 331,45 \$/yıl olarak hesaplanmasıdır. Negatif işletme maliyeti, sistemin yıllık bazda enerji fazlası üreterek ekonomik kazanç sağladığını göstermektedir. Bu senaryoda da yenilenebilir enerji oranı %100 olarak belirlenmiştir.

Sonuçlar, rüzgâr türbininin sisteme eklenmesiyle birlikte enerji üretiminin arttığını ve uzun vadede daha düşük birim enerji maliyeti elde edildiğini göstermektedir. Ancak bu durum, ilk yatırım maliyeti ve NPC değerlerinde artışa neden olmuştur.

#### 4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada Balıkesir'de bir çiftlik evi için tasarlanan hibrit yenilenebilir enerji sistemi, iki farklı senaryo üzerinden teknik ve ekonomik açıdan değerlendirilmiştir. Üçüncü bölümde sunulan simülasyon ve optimizasyon sonuçları, bu bölümde yorumlanarak neden-sonuç ilişkileri çerçevesinde tartışılmıştır. Değerlendirmeler, hibrit enerji sistemleri üzerine yapılan önceki çalışmalarla karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır.

##### 4.1. Senaryoların Teknik Değerlendirilmesi

Teknik açıdan her iki senaryo da sistem yükünü yıl boyunca kesintisiz şekilde karşılayabilmiş ve enerji arz güvenliği sağlanmıştır. Fotovoltaik ve biyogaz sistemlerinin birlikte kullanılması, özellikle güneş enerjisinin yetersiz kaldığı zaman dilimlerinde üretim sürekliliğini desteklemiştir. Bu durum, tarımsal ve kırsal uygulamalarda biyogaz entegrasyonunun sistem güvenilirliği açısından önemli bir katkı sunduğunu göstermektedir.

İkinci senaryoda rüzgâr enerjisinin sisteme eklenmesiyle birlikte enerji üretimi daha dengeli bir yapıya kavuşmuştur. Güneş ve rüzgâr kaynaklarının tamamlayıcı karakteri sayesinde, tek bir yenilenebilir kaynağa bağımlılık azalmış ve sistem esnekliği artmıştır. Bu sonuç, literatürde güneş ve rüzgâr enerjisinin birlikte kullanıldığı hibrit sistemlerin daha kararlı bir üretim profili sunduğunu ortaya koyan çalışmalarla uyumludur [2,3,7].

Her iki senaryoda da yenilenebilir enerji oranının %100 olması, sistemin çevresel sürdürülebilirlik açısından güçlü bir performans sergilediğini göstermektedir. Bu durum, kırsal bölgelerde fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması açısından hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin etkili bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır [3,7].

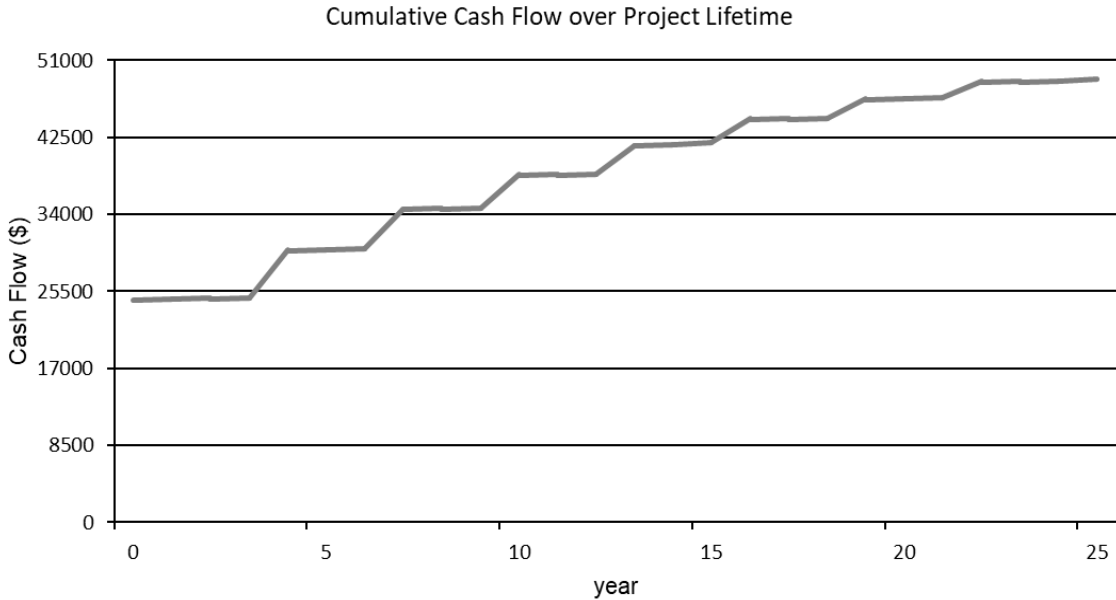
#### 4.2. Ekonomik Performansın Tartışılması

Ekonomik değerlendirme sonuçları, senaryolar arasında belirgin bir maliyet–performans dengesi bulunduğunu göstermektedir. İlk senaryoda daha düşük yatırım maliyetiyle ekonomik açıdan erişilebilir bir yapı elde edilirken, ikinci senaryoda artan yatırım maliyetine rağmen uzun vadeli enerji üretim maliyetlerinin azaldığı görülmüştür. Bu durum, rüzgâr enerjisinin sisteme entegrasyonu ile üretim çeşitliliğinin artmasının ekonomik performans üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır.

İkinci senaryoda enerji fazlası üretiminin oluşması, sistemin yalnızca kendi yükünü karşılamakla kalmayıp ekonomik gelir sağlayabilme potansiyeline de sahip olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, uzun vadeli bakış açısına sahip uygulamalarda daha yüksek ilk yatırım maliyetlerinin kabul edilebilir olabileceğini ortaya koymaktadır. Literatürde hibrit sistemlerde kaynak çeşitliliğinin artmasının birim enerji maliyetlerini düşürdüğü ve ekonomik sürdürülebilirliği güçlendirdiği vurgulanmaktadır [1,5,8].

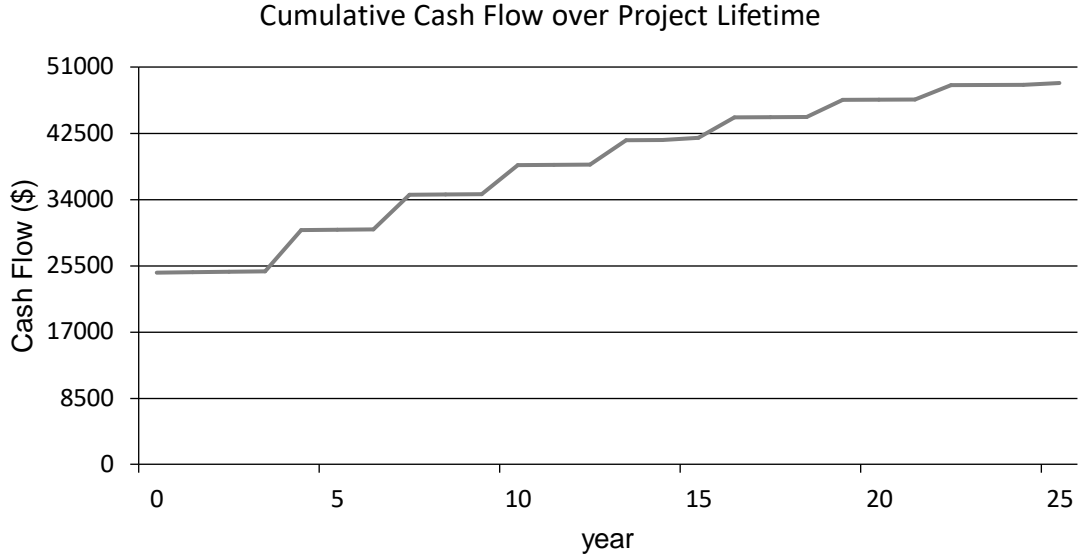
Dolayısıyla, elde edilen sonuçlar hibrit enerji sistemi tasarımında tek bir “en iyi” çözüm yerine, yatırım önceliklerine bağlı olarak farklı senaryoların tercih edilebileceğini göstermektedir. Kısa vadeli yatırım maliyetlerinin öncelikli olduğu durumlarda birinci senaryo öne çıkarken, uzun vadeli enerji maliyetlerinin azaltılmasının hedeflendiği uygulamalarda ikinci senaryo daha avantajlı bir yapı sunmaktadır.

Senaryo 1’e ait kümülatif nakit akışı grafiği, yatırımın kısa sürede geri kazanıldığını ve proje ömrü boyunca ekonomik kazancın istikrarlı biçimde arttığını göstermektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Senaryo 1 için proje ömrü boyunca kümülatif nakit akışı değişimi.

Senaryo 2'ye ait kümülatif nakit akışı grafiği, yatırımın kısa sürede geri kazanıldığını ve proje ömrü boyunca ekonomik kazancın istikrarlı biçimde arttığını göstermektedir (Şekil 6).



Şekil 6. Senaryo 2 için proje ömrü boyunca kümülatif nakit akışı değişimi.

Şekil 5 ve Şekil 6 birlikte değerlendirildiğinde, Senaryo 1'in daha kısa geri ödeme süresi sunmasına karşın Senaryo 2'nin uzun vadede daha yüksek kümülatif ekonomik kazanç sağladığı görülmektedir.

Tablo 5. Senaryo 1 kapsamında hibrit yenilenebilir enerji sisteminde aylık ve yıllık şebeke enerji alım-satım değerleri.

Ay	Satın Alınan Enerji (kWh)	Şebekeye Satılan Enerji (kWh)	Net Enerji Alımı (kWh)	Tepe Yük (kW)	Enerji Bedeli (\$)	Talep Bedeli (\$)	Toplam (\$)
Ocak	0	596	-596	0	-29,80	0,00	-29,80
Şubat	0	630	-630	0	-31,49	0,00	-31,49
Mart	0	863	-863	0	-43,16	0,00	-43,16
Nisan	0	896	-896	0	-44,80	0,00	-44,80
Mayıs	0	1.038	-1.038	0	-51,90	0,00	-51,90
Haziran	0	1.045	-1.045	0	-52,27	0,00	-52,27
Temmuz	0	1.121	-1.121	0	-56,05	0,00	-56,05
Ağustos	0	1.166	-1.166	0	-58,28	0,00	-58,28
Eylül	0	1.048	-1.048	0	-52,38	0,00	-52,38
Ekim	0	864	-864	0	-43,19	0,00	-43,19
Kasım	0	684	-684	0	-34,21	0,00	-34,21
Aralık	0	480	-480	0	-23,99	0,00	-23,99
<b>Yıllık</b>	<b>0</b>	<b>10.430</b>	<b>-10.430</b>	<b>0</b>	<b>-521,52</b>	<b>0,00</b>	<b>-521,52</b>

**Tablo 6.** Senaryo 2 kapsamında hibrit yenilenebilir enerji sisteminin aylık ve yıllık şebeke enerji alım-satım değerleri.

Ay	Satın Alınan Enerji (kWh)	Şebekeye Satılan Enerji (kWh)	Net Enerji Alımı (kWh)	Tepe Yük (kW)	Enerji Bedeli (\$)	Talep Bedeli (\$)	Toplam (\$)
Ocak	0	1.471	-1.471	0	-73,57	0,00	-73,57
Şubat	0	1.472	-1.472	0	-73,61	0,00	-73,61
Mart	0	1.848	-1.848	0	-92,42	0,00	-92,42
Nisan	0	1.715	-1.715	0	-85,75	0,00	-85,75
Mayıs	0	1.850	-1.850	0	-92,51	0,00	-92,51
Haziran	0	1.964	-1.964	0	-98,20	0,00	-98,20
Temmuz	0	2.279	-2.279	0	-113,93	0,00	-113,93
Ağustos	0	2.201	-2.201	0	-110,06	0,00	-110,06
Eylül	0	1.918	-1.918	0	-95,90	0,00	-95,90
Ekim	0	1.720	-1.720	0	-85,99	0,00	-85,99
Kasım	0	1.481	-1.481	0	-74,06	0,00	-74,06
Aralık	0	1.300	-1.300	0	-65,02	0,00	-65,02
<b>Yıllık</b>	<b>0</b>	<b>21.220</b>	<b>-21.220</b>	<b>0</b>	<b>-1.061,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-1.061,00</b>

Tablo 5 ve Tablo 6 birlikte değerlendirildiğinde, her iki senaryoda da sistemin yıl boyunca şebekeden enerji satın almadığı ve enerji ihtiyacının tamamen yerel yenilenebilir kaynaklardan karşılandığı görülmektedir. Bununla birlikte, Senaryo 2’de şebekeye satılan yıllık enerji miktarının Senaryo 1’e kıyasla belirgin biçimde daha yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum, rüzgâr enerjisinin sisteme entegrasyonu ile enerji üretim kapasitesinin artması ve üretim çeşitliliğinin sağlanmasıyla açıklanabilir. Sonuç olarak Senaryo 2, daha yüksek enerji fazlası üretimi sayesinde uzun vadede daha yüksek ekonomik gelir potansiyeli sunarken, Senaryo 1 daha sınırlı ancak istikrarlı bir şebeke satış performansı sergilemektedir.

#### 4.3. Literatürle Karşılaştırma

Bu çalışmada elde edilen bulgular, kırsal ve şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemleri üzerine yapılan önceki çalışmalarla genel olarak uyumludur. Benzer çalışmalarda, fotovoltaik sistemlerin ana enerji kaynağı olarak kullanıldığı, biyogaz veya jeneratör destekli yapıların ise sistem sürekliliğini artırdığı rapor edilmiştir [2,3]. Ayrıca, rüzgâr enerjisinin hibrit sistemlere entegrasyonunun birim enerji maliyetlerini düşürdüğü ve üretim dengesini iyileştirdiği literatürde yaygın olarak belirtilmektedir [7,8].

Çatı üstü fotovoltaik sistemlerin kırsal uygulamalardaki etkinliği ve mimari entegrasyonunun enerji üretimini olumlu yönde etkilediği, Arslan ve Türkdoğan tarafından yapılan çalışmada da vurgulanmıştır [4]. Bu bağlamda, Balıkesir örneğinde elde edilen sonuçlar hem ulusal hem de uluslararası literatürde rapor edilen hibrit sistem performansları ile tutarlılık göstermektedir.

#### 4.4. Çalışmanın Sınırları ve Genel Değerlendirme

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, kullanılan meteorolojik veriler, tanımlanan yük profili ve belirlenen sistem bileşenlerine bağlıdır. Yük profilinin yıl boyunca sabit kabul edilmesi ve enerji fiyatlarının zamana bağlı değişimlerinin dikkate alınmaması, analiz sonuçlarını sınırlayan temel varsayımlar arasında yer almaktadır. Bununla birlikte

kullanılan simülasyon ve değerlendirme yöntemi, benzer kırsal uygulamalara uyarlanabilecek genel bir yaklaşım sunmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, bu çalışma Balıkesir’de bir çiftlik evi için tasarlanan hibrit yenilenebilir enerji sisteminin teknik olarak güvenilir ve ekonomik açıdan uygulanabilir olduğunu ortaya koymaktadır. Fotovoltaik, biyogaz ve rüzgâr enerjisinin birlikte kullanıldığı çok kaynaklı hibrit sistemlerin, kırsal bölgelerde sürdürülebilir enerji çözümleri sunma potansiyeline sahip olduğu görülmektedir.

## 5. Sonuç

Bu çalışmada, Balıkesir’de bir çiftlik evi için hibrit yenilenebilir enerji sisteminin tasarımı ve simülasyonu gerçekleştirilmiş, sistem performansı iki farklı senaryo üzerinden değerlendirilmiştir. Üçüncü bölümde sunulan simülasyon sonuçları ve dördüncü bölümde yapılan tartışmalar birlikte ele alındığında, tasarlanan hibrit sistemin teknik açıdan güvenilir ve kırsal uygulamalar için uygulanabilir bir çözüm sunduğu görülmektedir.

Elde edilen bulgular, fotovoltaik ve biyogaz sistemlerinin birlikte kullanımının enerji sürekliliği açısından önemli bir avantaj sağladığını ortaya koymaktadır. Biyogaz sisteminin, güneş enerjisinin yetersiz kaldığı zaman dilimlerinde baz yükü desteklemesi, kırsal ve tarımsal uygulamalarda sistem güvenilirliğini artıran temel unsurlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Buna ek olarak, rüzgâr enerjisinin sisteme dâhil edildiği senaryoda üretim çeşitliliğinin arttığı ve sistemin daha dengeli bir enerji üretim profiline ulaştığı belirlenmiştir.

Bir önceki bölümde yapılan teknik ve ekonomik tartışmalar, hibrit enerji sistemi tasarımında tek bir “en uygun” çözüm yerine, yatırım önceliklerine bağlı olarak farklı senaryoların tercih edilebileceğini göstermektedir. Daha düşük başlangıç maliyetinin öncelikli olduğu durumlarda birinci senaryo öne çıkarken, uzun vadeli enerji üretim maliyetlerinin azaltılması ve enerji fazlası üretim potansiyelinin değerlendirilmek istendiği uygulamalarda ikinci senaryo daha avantajlı bir yapı sunmaktadır. Bu durum, hibrit sistem tasarımında maliyet ve performans arasında bir denge kurulması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, bu çalışma Balıkesir’de bir çiftlik evi ölçeğinde hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin kırsal bölgelerde sürdürülebilir enerji çözümleri sunabileceğini göstermektedir. Fotovoltaik, biyogaz ve rüzgâr enerjisinin birlikte kullanıldığı çok kaynaklı sistem yapısı hem enerji arz güvenliği hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır. Bu bağlamda elde edilen sonuçlar, benzer kırsal ve tarımsal uygulamalar için yol gösterici nitelikte olup, hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin yaygınlaştırılmasına yönelik çalışmalara katkı sağlamaktadır.

## Kaynaklar

- [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].Arslan, Furkan, and Sunay Türkdoğan."Kamu binalarında çatı üzeri fotovoltaik panel kurulum potansiyelinin belirlenmesi ve enerji üretim artışı için mimari tasarımın ele alınması: Yalova ili örneği." *Journal of Innovative Engineering and Natural Science* 2.2 (2022): 76–94.
- [5].Lambert, Tom, Paul Gilman, and Peter Lilienthal. "Micropower system modeling with HOMER." *Integration of alternative sources of energy* 1.1 (2006): 379-385..
- [6].Dufo-López, Rodolfo, and José L. Bernal-Agustín. "Design and control strategies of PV-Diesel systems using genetic algorithms." *Solar energy* 79.1 (2005): 33-46.
- [7]. Khan, M. Jahangir, and Mohammad Tariq Iqbal. "Pre-feasibility study of stand-alone hybrid energy systems for applications in Newfoundland." *Renewable energy* 30.6 (2005): 835-854.
- [8]. Al Garni, Hassan Z., Anjali Awasthi, and Makbul AM Ramli. "Optimal design and analysis of grid-connected photovoltaic under different tracking systems using HOMER." *Energy conversion and management* 155 (2018): 42-57.