



# **Konut Ölçekli Ada Mod Mikroşebekelerde Fotovoltaik, Rüzgâr ve Hibrit Sistemlerin HOMER Pro ile Teknik ve Ekonomik Değerlendirilmesi**

## **Techno-Economic Assessment of Photovoltaic, Wind, and Hybrid Systems in Residential-Scale Islanded Microgrids Using HOMER Pro**

**Kaan ÖZAY, İsmail YÜCEL, Hasan KAYA**

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

### **Özet**

Bu çalışmada, konut tipi bir elektrik talebinin karşılanması amacıyla geliştirilen ada mod hibrit yenilenebilir enerji sistemleri, Yalova ili için teknik ve ekonomik bakış açısıyla değerlendirilmiştir. Analiz kapsamında, aynı yük profili ve aynı iklim verileri kullanılarak üç farklı sistem yapısı modellenmiştir: fotovoltaik destekli, rüzgâr enerjisi destekli ve fotovoltaik-rüzgâr enerjisi bütünleşik hibrit sistemler. Tüm konfigürasyonlar dizel jeneratör ve akü enerji depolama birimi ile desteklenmiş ve HOMER Pro yazılımı kullanılarak saatlik çözünürlükte simüle edilmiştir. Sistemlerin performansı; toplam sistem maliyeti, birim enerji maliyeti, yenilenebilir enerji katkı oranı, dizel yakıt tüketimi ve jeneratör işletme karakteristikleri üzerinden karşılaştırılmıştır. Bulgular, fotovoltaik ağırlıklı yapıların maliyet etkinliği açısından öne çıktığını, buna karşın fotovoltaik ve rüzgâr kaynaklarının birlikte kullanıldığı hibrit sistemlerin fosil yakıt bağımlılığını belirgin şekilde azalttığını ortaya koymaktadır. Rüzgâr enerjisi baskın sistemlerin ise yüksek yatırım gereksinimi ve sınırlı ekonomik geri dönüş nedeniyle daha az avantajlı olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonuçları, konut ölçekli mikro-şebeke tasarımlarında sistem seçiminde yalnızca ekonomik kriterlerin değil, sürdürülebilirlik ve enerji arz güvenliği hedeflerinin de birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Hibrit yenilenebilir enerji sistemi, Ada mod mikro-şebeke, Fotovoltaik sistem, Rüzgâr enerjisi, Enerji depolama sistemleri, Dizel jeneratör, HOMER Pro, Teknik ve ekonomik analiz

## Abstract

In this study, islanded hybrid renewable energy systems developed to supply a residential electricity demand are evaluated from both technical and economic perspectives for the province of Yalova. Within the scope of the analysis, three different system configurations are modeled using the same load profile and identical climatic data: photovoltaic-based, wind energy-based, and integrated photovoltaic-wind hybrid systems. All configurations are supported by a diesel generator and battery energy storage system and are simulated at an hourly resolution using HOMER Pro software. System performance is compared in terms of total system cost, levelized cost of energy, renewable energy contribution, diesel fuel consumption, and generator operating characteristics. The results indicate that photovoltaic-dominated configurations stand out in terms of cost-effectiveness, whereas hybrid systems combining photovoltaic and wind energy significantly reduce fossil fuel dependency. Wind-dominated systems are found to be less favorable due to higher investment requirements and limited economic returns. The findings highlight that, in residential-scale microgrid design, system selection should consider not only economic criteria but also sustainability and energy supply security objectives.

**Keywords:** Hybrid renewable energy system, Islanded microgrid, Photovoltaic system, Wind energy, Energy storage systems, Diesel generator, HOMER Pro, Techno-economic analysis

## 1. Giriş

Dünya genelinde artan nüfus, sanayileşme ve teknolojik gelişmelerle birlikte enerjiye olan talep sürekli olarak artmaktadır. Günümüzde bu talebin büyük bir kısmı fosil yakıtlar aracılığıyla karşılanmakta olup, bu durum sera gazı emisyonlarının artmasına, çevresel sorunlara ve iklim değişikliğine neden olmaktadır. Fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olması ve çevresel etkileri göz önüne alındığında, enerji üretiminde yenilenebilir ve sürdürülebilir kaynaklara yönelmek kaçınılmaz hale gelmiştir [5].

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş ve rüzgâr enerjisi, temiz olmaları, geniş ölçekte uygulanabilirlikleri ve yüksek potansiyelleri nedeniyle ön plana çıkmaktadır. Güneş enerjisi, dünyanın yıllık enerji ihtiyacının çok üzerinde bir üretim potansiyeline sahipken, rüzgâr enerjisi de özellikle uygun coğrafi bölgelerde yüksek verimlilik sunmaktadır [1,5]. Ancak bu kaynakların doğası gereği kesintili olması, enerji üretiminde süreklilik problemlerini beraberinde getirmektedir. Bu durum, enerji depolama sistemleriyle desteklenen hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin önemini artırmaktadır [3,7].

Hibrit enerji sistemleri, birden fazla yenilenebilir enerji kaynağının birlikte kullanıldığı ve genellikle batarya gibi depolama birimleriyle desteklenen yapılardır. Bu sistemler sayesinde enerji arz güvenilirliği artırılmakta, yenilenebilir kaynakların kesintili yapısı dengelenmekte ve şebekeden bağımsız ya da yarı bağımsız çözümler üretilebilmektedir [2,6]. Özellikle konut tipi uygulamalarda hibrit sistemler, hem teknik hem de ekonomik açıdan avantajlı çözümler sunmaktadır [3,7].

Son yıllarda hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin tasarımı, analizi ve optimizasyonu amacıyla geliştirilen yazılımlar, bu alandaki akademik çalışmalara önemli katkılar sağlamıştır. Bu yazılımlar arasında HOMER Pro, mikro şebeke ve şebekeden bağımsız enerji sistemlerinin teknik ve ekonomik analizinde yaygın olarak kullanılan güvenilir bir araçtır [9]. HOMER Pro, farklı yenilenebilir enerji senaryolarının karşılaştırılmasına, sistem bileşenlerinin optimum boyutlandırılmasına ve maliyet analizlerinin yapılmasına olanak tanımaktadır [1,6].

Literatürde, konut ölçeğinde fotovoltaik, rüzgâr ve enerji depolama sistemlerini içeren birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar, hibrit sistemlerin tek kaynaklı sistemlere kıyasla daha kararlı ve verimli olduğunu ortaya koymaktadır [1-4,7]. Ayrıca fotovoltaik sistemlerin bina ölçeğinde uygulanabilirliği ve mimari tasarım ile enerji üretiminin artırılacağı de gösterilmiştir [4]. Bunun yanı sıra, hidrojen ve süperkapasitör gibi alternatif depolama teknolojilerinin hibrit sistemlere entegrasyonu da farklı uygulamalar için incelenmiştir [6,8].

Bu çalışmada, konut tipi bir elektrik yükünü beslemek amacıyla farklı yenilenebilir enerji sistemleri HOMER Pro yazılımı kullanılarak modellenmiş ve karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. İncelenen sistemler üç farklı senaryo kapsamında ele alınmıştır. İlk senaryoda fotovoltaik panel ve batarya tabanlı bir sistem, ikinci senaryoda rüzgâr türbini ve batarya içeren bir yapı, üçüncü senaryoda ise fotovoltaik panel, rüzgâr türbini ve bataryadan oluşan hibrit bir sistem değerlendirilmiştir. Tüm senaryolarda aynı yük profili kullanılarak sistemlerin teknik performansları karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, konut tipi uygulamalar için farklı yenilenebilir enerji senaryolarının karşılaştırmalı analizini yaparak, hangi sistem konfigürasyonunun daha uygun olduğunu ortaya koymaktır. Elde edilen sonuçların, küçük ölçekli hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin tasarımı ve planlanmasına katkı sağlaması hedeflenmektedir.

## 2. Sistem Tanıtımı

Bu çalışma, Marmara kıyı iklimini temsil edecek şekilde NASA POWER veri tabanından elde edilen güneş ve rüzgâr kaynakları kullanılarak, konut tipi bir yükü beslemek üzere tasarlanan üç ayrı ada mod mikro-şebeke topolojisini HOMER ortamında karşılaştırmaktadır. Yük profili aylık ortalama değerlerle tanımlanmış olup günlük enerji tüketimi 11.27 kWh/gün ve tepe güç gereksinimi 2.39 kW'tır. Çalışmanın proje ömrü 25 yıl olarak alınmıştır. Dizel yakıt birim fiyatı 1.5 \$/L kabul edilmiştir. Ekonomik değerlendirmede kullanılan NPC (Net Present Cost) ve LCOE (Levelized Cost of Energy) değerleri doğrudan HOMER sonuçlarından alınmış ve senaryoların karşılaştırılmasında temel metrikler olarak kullanılmıştır.

Tüm senaryolarda sistem güvenilirliğini sağlamak için ortak bileşenler olarak bir dizel jeneratör, bir akü enerji depolama sistemi ve AC/DC arayüz için çift yönlü konvertör (inverter/rectifier) kullanılmıştır. Senaryolar arasındaki temel fark, yenilenebilir üretim kaynağının PV, rüzgâr türbini veya her ikisinin birlikte kullanımı olmasıdır.

### Ortak Bileşenler ve Parametreler

**Dizel jeneratör:** Jeneratör HOMER'da auto-sized olarak modellenmiştir. Minimum yük oranı %35, minimum çalışma süresi 30 dakika ve ömür 15,000 saat olarak tanımlanmıştır. Yakıt tüketimi doğrusal yakıt eğrisi ile modellenmiş olup kesişim 0.151 L/saat ve eğim 0.236 L/saat/kW'tır. Jeneratör maliyetleri \$500/kW CAPEX, \$500/kW replacement ve \$0.030/çalışma saati O&M olarak girilmiştir. Yakıt tüketimini sınırlamak amacıyla yıllık yakıt limiti senaryolara göre uygulanmıştır.

**Akü sistemi:** Depolama birimi “Generic 1 kWh Lead-Acid (Kinetic Battery Model)” olarak seçilmiştir. Nominal gerilim 12 V, çevrim verimi %80 ve minimum SoC %40’tır. Akü ömrü 10 yıl veya 800 kWh throughput sınırı ile modellenmiştir. Birim maliyetler \$300 CAPEX, \$300 replacement ve \$10/yıl O&M’dır. Akü sayısı senaryolara göre HOMER optimizasyonu ile belirlenmiştir.

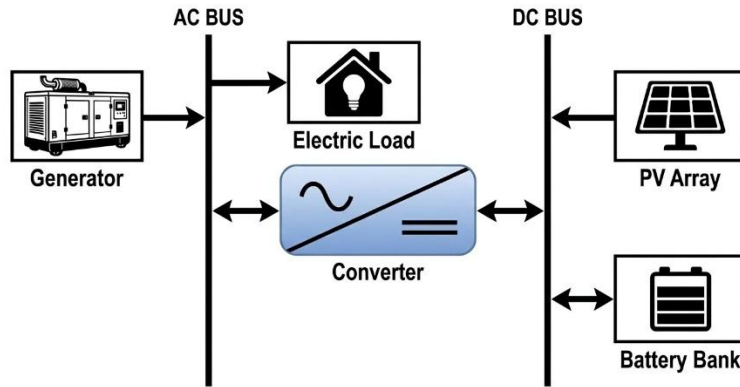
**Konvertör:** AC/DC dönüşümü için Conext SW2524 tabanlı çift yönlü konvertör kullanılmıştır. İnverter ve doğrultucu verimi %90, ömrü 10 yıl olarak alınmıştır. Konvertör için girilen maliyetler \$1300 CAPEX ve \$1800 replacement’tır. Konvertör kapasitesi arama uzayında değerlendirilmiştir.

**İşletme ayarları:** HOMER’da dispatch stratejisi senaryolarda Load Following (LF) ağırlıklı olacak şekilde değerlendirilmiştir. Ayrıca operating reserve seçeneği aktif edilmiştir. Sistem güvenilirliği unmet load / capacity shortage çıktıları üzerinden değerlendirilmiştir ve sonuçlar bölümünde raporlanmıştır.

### Senaryo 1: PV + Jeneratör + Akü (PV-baskın sistem)

Bu senaryoda PV üretimi DC bara üzerinden bataryayı şarj eder ve yük, konvertör aracılığıyla AC tarafta beslenir. Jeneratör AC baraya bağlı olup yenilenebilir üretimin yetersiz kaldığı durumlarda devreye girer. PV kaynağı NASA POWER’dan alınmış ve PV bileşeni flat-plate olarak modellenmiştir. HOMER optimizasyonu sonucunda bu senaryonun kazanan boyutlandırması:

- PV kapasitesi: 3 kW
- Batarya: 20 adet (20 kWh nominal)
- Konvertör: 1 kW sınıfı
- Jeneratör: auto-sized
- Yıllık jeneratör yakıt limiti: 500 L/yıl

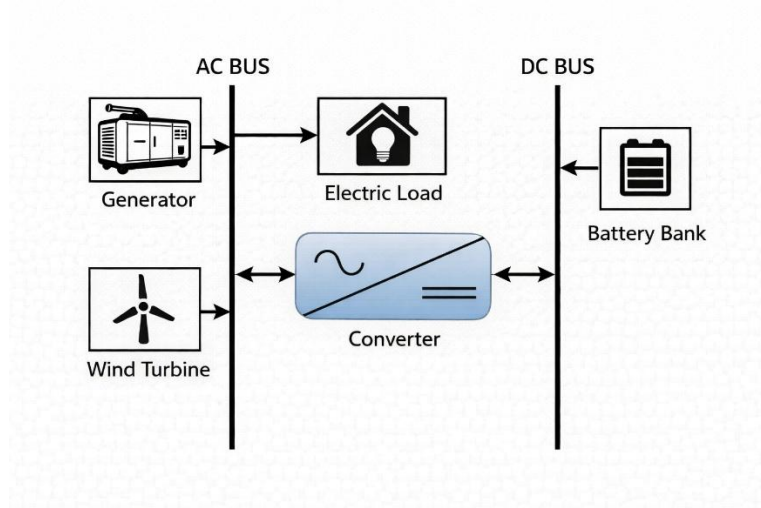


Şekil 1 Senaryo 1 mimarisi

### Senaryo 2: Rüzgâr + Jeneratör + Akü (Wind-baskın sistem)

Bu senaryoda rüzgâr türbini(leri) AC baraya bağlanarak yükü besler; fazla enerji konvertör üzerinden DC tarafa aktarılarak batarya şarj edilir. Rüzgâr kaynağı NASA POWER’dan alınmıştır. Kullanılan türbin modeli Generic 3 kW olup türbin birim maliyetleri \$18,000 CAPEX, \$18,000 replacement ve \$180/yıl O&M’dır. Türbin hub yüksekliği 17 m olarak tanımlanmıştır. HOMER optimizasyonu sonucunda kazanan boyutlandırma:

- Rüzgâr türbini: 2 adet (toplam 6 kW)
- Batarya: 6 adet (6 kWh nominal)
- Konvertör: 1 kW sınıfı
- Jeneratör: auto-sized
- Yıllık jeneratör yakıt limiti: 1000 L/yıl

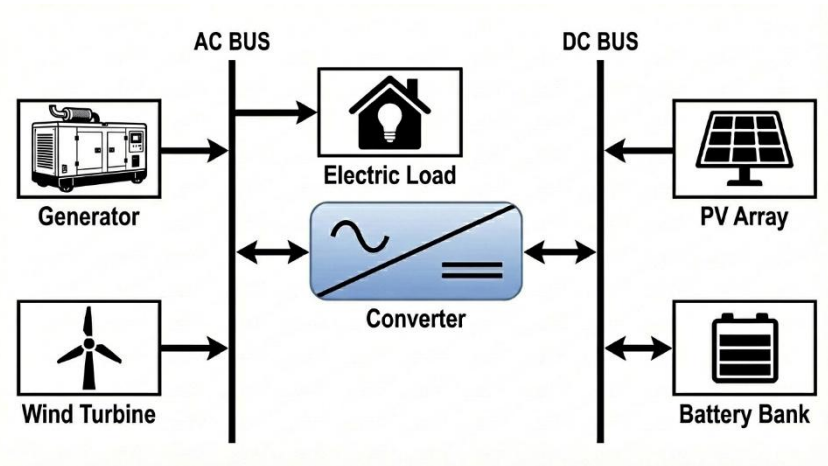


Şekil 2 Senaryo 2 mimarisi

### Senaryo 3: PV + Rüzgâr + Jeneratör + Akü (Hibrit sistem)

Bu senaryoda PV (DC tarafta) ve rüzgâr türbini (AC tarafta) birlikte çalışarak dizel bağımlılığını azaltmayı hedefler. Batarya ve konvertör her iki kaynaktan enerji yönetimini mümkün kılar; jeneratör yalnızca yetersizlik durumlarında devreye girer. HOMER optimizasyonu sonucunda kazanan boyutlandırma:

- PV kapasitesi: 2.5 kW ( $\approx 2.475$  kW)
- Rüzgâr türbini: 1 adet (3 kW)
- Batarya: 15 adet (15 kWh nominal)
- Konvertör:  $\approx 2$  kW sınıfı
- Jeneratör: auto-sized
- Yıllık jeneratör yakıt limiti: 500 L/yıl



Şekil 3 Senaryo 3 mimarisi

### 3. Analiz ve Yöntem

#### 3.1. Modelleme Yaklaşımı

Çalışmada üç mikro-şebeke senaryosu HOMER Pro’da ayrı tasarım olarak kurulmuş ve her senaryo için optimizasyon çalıştırılmıştır. Tüm senaryolarda aynı yük profili ve aynı kaynak verileri kullanılarak karşılaştırmanın yalnızca sistem konfigürasyonundan kaynaklanması hedeflenmiştir. Her senaryoda HOMER’in saatlik simülasyon ve ekonomik hesaplama çıktıları kullanılarak teknik ve ekonomik performans değerlendirilmiştir [1,3].

#### 3.2. Girdi Verileri ve Simülasyon Kurulumu

Yük profili aylık ortalama değerlerle tanımlanmıştır (11.27 kWh/gün, 2.39 kW tepe). Güneş ve rüzgâr kaynak verileri NASA POWER veri tabanından alınarak HOMER’a girilmiştir. Proje ömrü 25 yıl olarak belirlenmiştir. Dizel yakıt fiyatı 1.5 \$/L kabul edilmiştir. İskonto oranı/faiz ve enflasyon parametreleri ayrıca girilmemiştir; bu nedenle NPC ve LCOE değerleri HOMER’in ilgili ekonomik varsayımları çerçevesinde raporlanmış ve senaryoların karşılaştırılmasında metrik olarak kullanılmıştır [1,3].

#### 3.3. Optimizasyon ve Arama Uzayı

Her senaryoda sistem bileşenleri için HOMER arama uzayı tanımlanarak farklı boyut kombinasyonları taranmıştır. Bu kapsamda PV kapasitesi, rüzgâr türbini adedi, batarya adedi ve konvertör kapasitesi senaryoya uygun şekilde arama uzayına dahil edilmiştir. Jeneratör bileşeni auto-sized bırakılmıştır. Her senaryoda HOMER, tanımlanan arama uzayı içinde kısıtları sağlayan çözümler arasından en düşük maliyetli (NPC tabanlı) çözümü “kazanan” olarak seçmiştir [1,3].

#### 3.4. İşletme Stratejisi ve Kısıtlar

Tüm senaryolarda işletme/dispatch seçeneği Load Following (LF) olarak uygulanmıştır. Ayrıca operating reserve seçeneği aktif edilmiştir. Dizel bağımlılığını kontrol etmek amacıyla yıllık jeneratör yakıt tüketimine üst sınır getirilmiştir. PV-baskın ve hibrit senaryolarda yıllık yakıt limiti 500 L/yıl; rüzgâr-baskın senaryoda sistemin fizibil çözüm üretebilmesi için 1000 L/yıl olarak belirlenmiştir. Bu yaklaşım, jeneratörün “sınırsız yedek kaynak” gibi davranmasını engelleyerek yenilenebilir kaynakların katkısını daha görünür hale getirmek amacıyla kullanılmıştır [4].

#### 3.5. Performans Göstergeleri ve Karşılaştırma Kriterleri

Senaryoların karşılaştırılmasında HOMER çıktılarından elde edilen temel göstergeler kullanılmıştır. Ekonomik değerlendirmede NPC ve LCOE; işletme boyutunda yıllık yakıt tüketimi, jeneratör çalışma saatleri ve yıllık işletme maliyeti izlenmiştir. Yenilenebilir katkı Renewable Fraction (%) metriğiyle değerlendirilmiştir. Sistem güvenilirliği ise unmet load ve capacity shortage sonuçları üzerinden kontrol edilmiştir. Sonuçlar bölümünde her senaryo için bu göstergeler birlikte raporlanarak teknik ve ekonomik açıdan karşılaştırma yapılmıştır [2].

Tablo 1. HOMER Pro modelleme girdileri, ortak bileşen parametreleri ve kısıtlar (Yöntem Özeti)

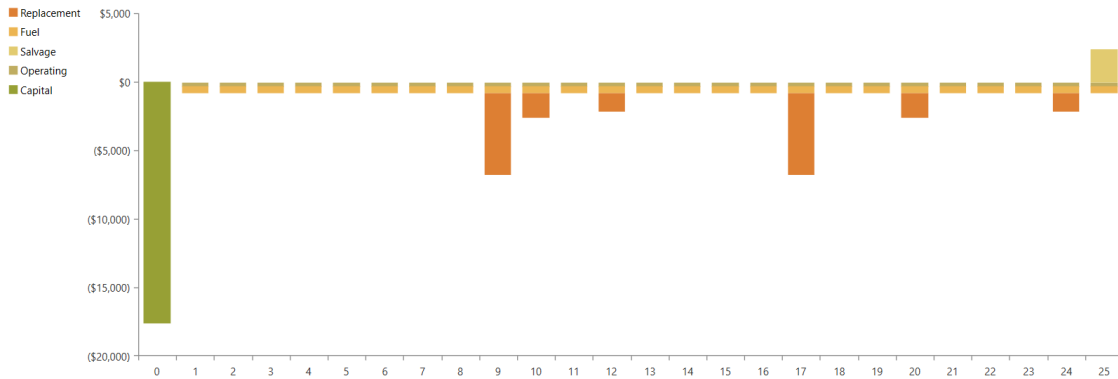
<b>Kategori</b>	<b>Parametre</b>	<b>Değer / Açıklama</b>
Çalışma horizon'u	Proje ömrü	25 yıl
Yük	Yük tanımı	Aylık ortalama giriş (monthly average)
Yük	Günlük enerji tüketimi	11.27 kWh/gün
Yük	Tepe güç	2.39 kW
Kaynak verisi	Güneş kaynağı	NASA POWER
Kaynak verisi	Rüzgâr kaynağı	NASA POWER
Yakıt	Dizel yakıt fiyatı	1.5 \$/L
İşletme/Dispatch	Dispatch stratejisi	Load Following (LF)
Güvenilirlik	Operating reserve	Aktif
Jeneratör	Boyutlandırma	Auto-sized
Jeneratör	Minimum yük oranı	%35
Jeneratör	Minimum çalışma süresi	30 dakika
Jeneratör	Ömür	15,000 saat
Jeneratör	Yakıt eğrisi	Intercept: 0.151 L/saat; Slope: 0.236 L/saat/kW
Jeneratör	Maliyet (CAPEX)	500 \$/kW
Jeneratör	Maliyet (Replacement)	500 \$/kW
Jeneratör	Maliyet (O&M)	0.030 \$/çalışma saati
Akü	Akü modeli	Generic 1 kWh Lead-Acid (Kinetic Battery Model)
Akü	Nominal gerilim	12 V
Akü	Çevrim verimi	%80
Akü	Minimum SoC	%40
Akü	Ömür kriteri	10 yıl veya 800 kWh throughput
Akü	Maliyet (CAPEX)	300 \$/adet
Akü	Maliyet (Replacement)	300 \$/adet
Akü	Maliyet (O&M)	10 \$/yıl
Konvertör	Konvertör modeli	Conext SW2524 (çift yönlü inverter/rectifier)
Konvertör	Verim	%90
Konvertör	Ömür	10 yıl
Konvertör	Maliyet (CAPEX)	1300 \$
Konvertör	Maliyet (Replacement)	1800 \$
Senaryo kısıtı	Yakıt limiti – Senaryo 1 (PV+Gen+Akü)	500 L/yıl
Senaryo kısıtı	Yakıt limiti – Senaryo 2 (Wind+Gen+Akü)	1000 L/yıl
Senaryo kısıtı	Yakıt limiti – Senaryo 3 (PV+Wind+Gen+Akü)	500 L/yıl
Çıktı metrikleri	Karşılaştırma ölçütleri	NPC, LCOE, Renewable Fraction, Total Fuel, Gen Hours, Operating Cost, CAPEX

#### 4. Sonuçlar ve tartışma

Bu bölümde, HOMER Pro ortamında oluşturulan üç senaryonun (PV+battery+gen, rüzgâr+battery+gen ve PV+rüzgâr+battery+gen) teknik ve ekonomik performansı karşılaştırılmıştır. Değerlendirme; Net Present Cost (NPC), Levelized Cost of Energy (LCOE), yatırım maliyeti (CAPEX), yıllık işletme maliyeti, yenilenebilir enerji oranı (Renewable Fraction), yıllık yakıt tüketimi ve jeneratör kullanım karakteristiği (çalışma saati ve üretim) üzerinden yapılmıştır. HOMER, tanımlanan bileşen aralıkları içindeki tüm olası kombinasyonları simüle ederek uygun olmayan çözümleri eler ve uygulanabilir çözümleri maliyet metriklerine (özellikle NPC) göre sıralar; bu nedenle karşılaştırmanın omurgası Tablo 2’dir [1,3]. NPC ve LCOE gibi ekonomik metriklerin hesaplanmasında iskonto/faiz ve enflasyon gibi parametrelerin rolü literatürde açıkça vurgulanmakta olup bu çalışmada NPC ve LCOE değerleri doğrudan HOMER sonuçlarından alınarak karşılaştırma metriği olarak kullanılmıştır [1-3].

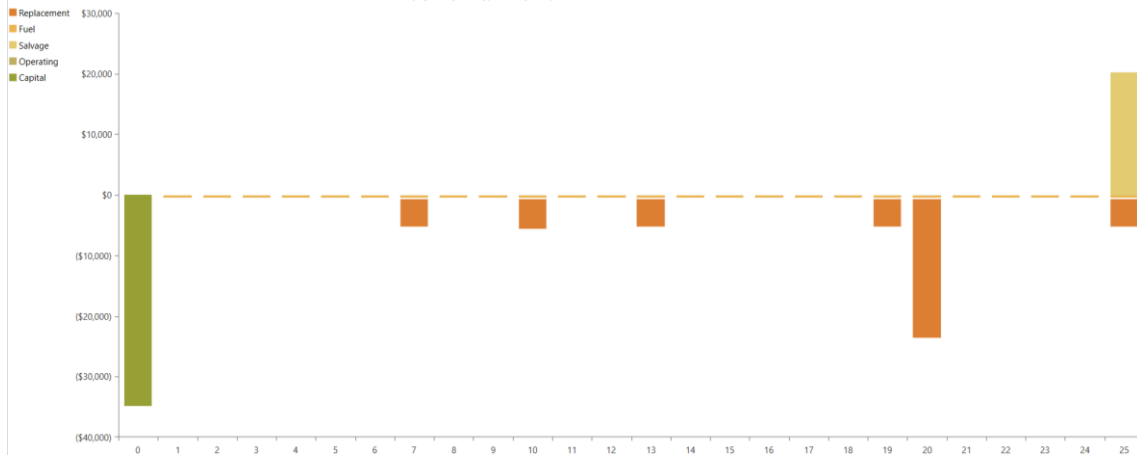
##### 4.1 Ekonomik karşılaştırma (NPC, LCOE, CAPEX ve işletme maliyeti)

Tablo 2’ye göre en düşük toplam maliyet (NPC) ve en düşük birim enerji maliyeti (LCOE) **Senaryo 1 (PV + Jeneratör + Akü)** konfigürasyonunda elde edilmiştir (NPC = 36,344.82 \$, LCOE = 0.6836 \$/kWh). Bu senaryoda başlangıç yatırımı da diğer senaryolara kıyasla daha düşüktür (CAPEX = 17,650 \$) ve yıllık işletme maliyeti görece düşük seviyede kalmıştır (Operating cost = 1,446.13 \$/yıl). Literatürde de HOMER tabanlı çalışmalarda PV destekli hibrit sistemlerin, doğru boyutlandırma ile daha düşük maliyetli çözümler üretebildiği; ekonomik metriklerin (NPC/COE/LCOE) sistem seçiminde belirleyici olduğu ifade edilmektedir [1,3].



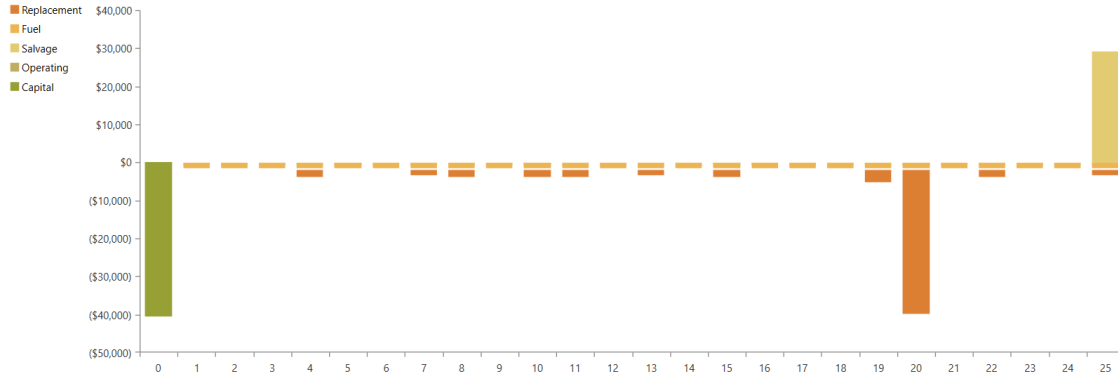
Şekil 4 Senaryo 1

**Senaryo 3 (PV + Rüzgâr + Jeneratör + Akü)** hibrit yapı olması nedeniyle daha yüksek yenilenebilir payı sağlasa da, ek üretim kaynağı ve buna bağlı bileşen maliyetleri nedeniyle ekonomik olarak Senaryo 1’in gerisinde kalmıştır (NPC = 57,197.00 \$, LCOE = 1.0757 \$/kWh). Bu senaryoda CAPEX’in artması (34,860 \$), toplam ekonomik metriği yukarı çekmiştir; buna karşın işletme maliyeti Senaryo 1’e yakın kalmıştır (Operating cost = 1,727.86 \$/yıl). Hibrit sistemlerde bileşen çeşitliliği arttıkça yatırım/yenileme maliyetlerinin NPC üzerinde baskın hâle gelebildiği HOMER literatüründe raporlanan bir bulgudur [1,3].



Şekil 5 senaryo 3

**Senaryo 2 (Rüzgâr + Jeneratör + Akü)** ise çalışmada en yüksek NPC ve LCOE değerlerine sahip senaryo olmuştur (NPC = 80,773.99 \$, LCOE = 1.5192 \$/kWh). Bu senaryoda hem yatırım maliyeti yüksektir (CAPEX = 40,450 \$) hem de jeneratör bağımlılığı daha fazladır; bu da yıllık işletme maliyetini yükseltmiştir (Operating cost = 3,119.24 \$/yıl). Rüzgâr içeren hibrit sistemlerde sonuçların; rüzgâr hızı, türbin kule/hub yüksekliği ve dizel fiyatı gibi değişkenlere duyarlı olduğu, bu nedenle maliyet ve uygulanabilirliğin lokasyona ve türbin parametrelerine bağlı olarak değişebildiği literatürde özellikle sensitivity analizleriyle gösterilmektedir [2,3].



Şekil 6 Senaryo 2

#### 4.2 Yenilenebilir payı ve üretim dağılımı (Sürdürülebilirlik değerlendirmesi)

Yenilenebilir enerji oranı (Renewable Fraction) açısından bakıldığında senaryolar arasında belirgin fark oluşmuştur. **Senaryo 3**, %87.23 ile en yüksek yenilenebilir payı sağlamıştır. **Senaryo 1**'de yenilenebilir pay %68.63 iken, **Senaryo 2**'de bu oran %41.32 seviyesinde kalmıştır. Bu sonuç, PV+rüzgâr hibrit yapısının sürdürülebilirlik açısından güçlü olduğunu; ancak ekonomik optimumun (düşük NPC/LCOE) her zaman en yüksek yenilenebilir oranla çakışmadığını göstermektedir [1,3]. Ayrıca konut/bina ölçeğinde PV uygulamalarının yüksek potansiyele sahip olduğu ve tasarım aşamasında PV'nin dikkate alınmasının enerji üretimini anlamlı ölçüde artırabileceği literatürde vurgulanmaktadır;

bu durum, PV içeren senaryoların (S1 ve S3) yenilenebilir payı açısından daha avantajlı olmasını açıklayıcıdır [4].

Elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı birlikte değerlendirildiğinde; Senaryo 1’de PV’nin ana üretim kaynağı olarak jeneratör ihtiyacını azalttığı, Senaryo 2’de rüzgâr olmasına rağmen jeneratörün sistemde daha baskın kaldığı, Senaryo 3’te ise PV+rüzgâr kombinasyonunun jeneratör ihtiyacını ciddi biçimde azalttığı görülmektedir. HOMER yaklaşımında, kesintili yenilenebilir üretimin depolama ile desteklenmesi arz sürekliliğini artıran temel mekanizmadır; bu nedenle üretim karması ve depolama etkileşimi hibrit sistem performansında kritik rol oynar [1,3].

### 4.3 Yakıt tüketimi ve jeneratör çalışma karakteri (kısıtların etkisi)

Jeneratör yakıt tüketimi ve çalışma davranışı, senaryoların hem sürdürülebilirlik hem de işletme maliyeti performansını belirlemiştir. Senaryo 1 ve Senaryo 3’te yıllık jeneratör yakıt tüketimini sınırlamak amacıyla 500 L/yıl yakıt limiti uygulanmış, Senaryo 2’de ise çözümün oluşabilmesi için bu limit 1000 L/yıl seviyesinde tanımlanmıştır. Literatürde de dizel fiyatı ve jeneratör işletim koşullarının (çalışma yük aralıkları vb.) maliyet sonuçlarını doğrudan etkilediği ve bu nedenle karşılaştırmalarda yakıt/jeneratör varsayımlarının açıkça raporlanması gerektiği belirtilmektedir [2,3]. Bu çalışmada karşılaştırma yapılırken yakıt limitlerindeki farklılık göz önünde bulundurularak sonuçlar yorumlanmıştır.

Tablo 2 sonuçlarına göre:

- **Senaryo 1:** Yakıt tüketimi 494.30 L/yıl, jeneratör çalışma süresi 1,258 saat/yıl, jeneratör üretimi 1,290.18 kWh/yıl.
- **Senaryo 2:** Yakıt tüketimi 941.87 L/yıl, jeneratör çalışma süresi 2,467 saat/yıl, jeneratör üretimi 2,413.67 kWh/yıl.
- **Senaryo 3:** Yakıt tüketimi 205.84 L/yıl, jeneratör çalışma süresi 543 saat/yıl, jeneratör üretimi 525.03 kWh/yıl.

Bu bulgular iki kritik sonucu ortaya koymaktadır: (i) en düşük dizel bağımlılığı Senaryo 3’te elde edilmiştir (yakıt tüketimi ve jeneratör çalışma saati en düşük), (ii) en düşük maliyet Senaryo 1’de elde edilmiştir (NPC ve LCOE en düşük). Dolayısıyla konut ölçeği için “en ekonomik çözüm” PV-baskın (S1) senaryo iken, “en yüksek yenilenebilir penetrasyon ve en düşük dizel bağımlılığı” hibrit PV+rüzgâr (S3) senaryosunda sağlanmıştır [1,3]. Öte yandan her üç senaryoda da unmet load ve capacity shortage değerlerinin %0 olması, kurulan mimarilerin belirlenen yük talebini güvenilir biçimde karşıladığını göstermektedir [3].

Tablo 2. Senaryoların özet teknik–ekonomik karşılaştırması

Senaryo	NPC (\$)	LCOE (\$/kWh)	CAPEX (\$)	Operating cost (\$/yr)	Renewable Fraction (%)	Total Fuel (L/yr)	Gen Hours (hr/yr)	Gen Production (kWh/yr)
<b>S1: PV + Gen + Battery</b>	36,344.82	0.6836	17,65	1,446.13	68.63	494.30	1,258	1,290.18
<b>S2: Wind + Gen + Battery</b>	80,773.99	15.192	40,45	3,119.24	41.32	941.87	2,467	2,413.67
<b>S3: PV + Wind + Gen + Battery</b>	57,197.00	10.757	34,86	1,727.86	87.23	205.84	543	525.03

## 5. Sonuç

Bu çalışmada, konut ölçekli bir elektrik yükünün karşılanması amacıyla tasarlanan ada mod mikroşebeke sistemleri, fotovoltaiik (PV), rüzgâr ve PV–rüzgâr hibrit senaryoları kapsamında teknik ve ekonomik açıdan karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Aynı yük profili ve aynı meteorolojik koşullar altında gerçekleştirilen HOMER Pro tabanlı simülasyonlar sayesinde, sistem konfigürasyonlarının performansları objektif bir şekilde analiz edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, PV ağırlıklı sistemlerin daha düşük yatırım maliyeti ve birim enerji maliyeti (LCOE) sunarak ekonomik açıdan daha avantajlı olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, PV ve rüzgâr kaynaklarının birlikte kullanıldığı hibrit sistemlerin yenilenebilir enerji katkı oranını artırarak dizel jeneratör bağımlılığını önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir. Bu durum, hibrit yapıların çevresel sürdürülebilirlik ve fosil yakıt kullanımının azaltılması açısından güçlü bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır. Rüzgâr enerjisi baskın sistemler ise yüksek yatırım maliyetleri ve artan jeneratör kullanım gereksinimi nedeniyle hem ekonomik hem de işletme açısından daha sınırlı bir performans sergilemiştir.

Çalışma bulguları, konut tipi ada mod mikroşebeke tasarımlarında tek bir “en iyi” çözümden ziyade, uygulamanın önceliklerine bağlı olarak farklı sistem yapılandırmalarının tercih edilebileceğini göstermektedir. Ekonomik kriterlerin ön planda olduğu uygulamalarda PV tabanlı sistemler daha uygun bir seçenek sunarken, sürdürülebilirlik ve enerji arz güvenliğinin önceliklendirildiği durumlarda PV–rüzgâr hibrit sistemlerin daha etkin çözümler sağladığı görülmektedir.

Sonuç olarak bu çalışma, küçük ölçekli ada mod mikroşebekelerde farklı yenilenebilir enerji senaryolarının teknik ve ekonomik etkilerini bütüncül bir bakış açısıyla ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçların, benzer iklim koşullarına sahip bölgelerde konut tipi mikroşebeke tasarımı ve planlaması için yol gösterici nitelikte olduğu değerlendirilmektedir. Gelecek çalışmalarda farklı enerji depolama teknolojilerinin (örneğin lityum-iyon, hidrojen veya süperkapasitör) sisteme entegrasyonu ve yük profilinin çeşitlendirilmesi ile daha kapsamlı analizler yapılması önerilmektedir.

## Kaynaklar

- [1].Turkdoğan, 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]. Saidur, Rahman, et al. "Environmental impact of wind energy." *Renewable and sustainable energy reviews* 15.5 (2011): 2423-2430.
- [6]. Gökçek, Murat, and Cihangir Kale. "Optimal design of a hydrogen refuelling station (HRFS) powered by hybrid power system." *Energy Conversion and Management* 161 (2018): 215-224.
- [7]. Maleki, Akbar, Marc A. Rosen, and Fathollah Pourfayaz. "Optimal operation of a grid-connected hybrid renewable energy system for residential applications." *Sustainability* 9.8 (2017): 1314.
- [8]. Kong, Lingguo, Jiamin Yu, and Guowei Cai. "Modeling, control and simulation of a photovoltaic/hydrogen/supercapacitor hybrid power generation system for grid-connected applications." *International journal of hydrogen energy* 44.46 (2019): 25129-25144.
- [9]. Mehta, Sahil, and Prasenjit Basak. "A case study on PV assisted microgrid using HOMER pro for variation of solar irradiance affecting cost of energy." *2020 IEEE 9th power india international conference (PIICON)*. IEEE, 2020.