



# **Bursa Orhaneli’nde Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Destekli Hibrit Enerji Sistemi Tasarımı ve Optimizasyonu**

## **Design and Optimization of an Electric Vehicle Charging Station Supported Hybrid Energy System in Bursa Orhaneli**

**Burhan TAYIR, Yunus Talha GÖKÇE**

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

### **Özet**

Bu çalışmada, Bursa ili Orhaneli ilçesi Kadı Mahallesi’nde kurulması planlanan bir elektrikli araç şarj istasyonunun enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla fotovoltaik (PV), rüzgâr türbini, batarya depolama sistemi ve şebeke destekli hibrit bir enerji sistemi tasarlanmıştır. Sistem tasarımı ve optimizasyonu HOMER Pro Microgrid Analysis Tool yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada, toplam günlük elektrik tüketimi 450 kWh/gün olan yerleşim yükü ve buna ek olarak tanımlanan 60 kWh/gün elektrikli araç şarj yükü için farklı PV kapasiteleri, rüzgâr türbini sayıları, batarya kapasiteleri ve dönüştürücü değerleri tanımlanmış ve en düşük net bugünkü maliyet (NPC) esas alınarak optimizasyon yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, şebeke destekli hibrit sistemlerin yalnızca yenilenebilir kaynaklara dayalı sistemlere kıyasla daha düşük birim enerji maliyeti (LCOE) ve daha yüksek işletme güvenilirliği sunduğunu göstermiştir. Bu yönüyle çalışma, kırsal bölgelerde kurulacak elektrikli araç şarj altyapıları için uygulanabilir bir çözüm ortaya koymaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Hibrit enerji sistemi, Elektrikli araç şarj istasyonu, Fotovoltaik sistem, Rüzgâr enerjisi, HOMER PRO

## Abstract

In this study, a grid-connected hybrid energy system consisting of photovoltaic (PV) panels, wind turbines, battery energy storage, and the utility grid was designed to supply the energy demand of an electric vehicle charging station planned in the Kadi District of Orhaneli, Bursa. The system design and optimization were carried out using the HOMER Pro Microgrid Analysis Tool.

Different PV capacities, numbers of wind turbines, battery storage capacities, and converter ratings were defined for a residential load with a total daily electricity consumption of 450 kWh/day, along with an additional electric vehicle charging load of 60 kWh/day, and the system was optimized based on the minimum net present cost (NPC) criterion.

The results indicate that grid-supported hybrid energy systems provide lower levelized cost of energy (LCOE) and higher operational reliability compared to fully renewable off-grid configurations. Therefore, the proposed system presents a technically and economically feasible solution for electric vehicle charging infrastructure in rural areas.

**Keywords:** Hybrid energy system, Electric vehicle charging station, Photovoltaic system, Wind energy, HOMER PRO

## 1. Giriş

Son yıllarda artan enerji talebi, fosil yakıt kaynaklarının çevresel etkileri ve elektrikli araç (EA) kullanımının hızla yaygınlaşması, enerji üretiminde yenilenebilir ve hibrit enerji sistemlerinin önemini artırmıştır. Özellikle elektrikli araç şarj altyapılarının yaygınlaşmasıyla birlikte, bu istasyonların enerji ihtiyacının güvenilir, ekonomik ve çevre dostu yöntemlerle karşılanması gerekliliği ortaya çıkmıştır [1].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının tek başına kullanımı, kaynakların süreksizliği nedeniyle her zaman yeterli ve güvenilir bir çözüm sunamamaktadır. Bu nedenle fotovoltaik (PV), rüzgâr enerjisi, batarya depolama sistemleri ve gerektiğinde şebeke desteğini bir arada kullanan hibrit enerji sistemleri, hem teknik hem de ekonomik açıdan avantajlı çözümler sunmaktadır [2]. Hibrit sistemler, enerji arz güvenliğini artırırken aynı zamanda birim enerji maliyetlerinin düşürülmesine olanak sağlamaktadır.

Literatürde yapılan birçok çalışmada, şebekeden bağımsız ve şebeke destekli hibrit enerji sistemlerinin farklı yük profilleri için uygulanabilirliği incelenmiştir. Türkođan ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda, konut yükleri, çiftlik evleri ve toplu yaşam alanları için tasarlanan hibrit sistemlerin teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilir olduğu gösterilmiştir [2], [3]. Bu çalışmalar, doğru sistem boyutlandırması ve optimizasyonun, sistem performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Elektrikli araçların enerji sistemlerine entegrasyonu ise hibrit sistem tasarımını daha da önemli hale getirmektedir. Elektrikli araç şarj yükleri, ani güç talepleri ve yüksek enerji tüketimleri nedeniyle klasik şebeke altyapısı üzerinde ek bir yük oluşturmaktadır. Bu durum, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenen yerel mikroşebeke çözümlerini ön plana çıkarmaktadır [1]. Ayrıca, şebeke destekli yapılar sayesinde sistemlerin hem kesintisiz çalışması sağlanmakta hem de yatırım maliyetleri optimize edilebilmektedir.

Hibrit enerji sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonunda, HOMER Pro yazılımı literatürde yaygın olarak kullanılan güçlü bir analiz aracıdır. HOMER Pro; farklı enerji kaynaklarının, depolama sistemlerinin ve şebeke bağlantı seçeneklerinin teknik ve

ekonomik karşılaştırmasını yaparak en uygun sistem konfigürasyonunun belirlenmesine olanak sağlamaktadır [3], [5]. Bu yönüyle yazılım, özellikle kırsal bölgelerde ve elektrikli araç şarj istasyonları gibi yüksek güvenilirlik gerektiren uygulamalarda önemli bir karar destek aracı olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, Bursa ili Orhaneli ilçesi Kadı Mahallesi'nde kurulması planlanan bir elektrikli araç şarj istasyonu için PV, rüzgâr türbini, batarya depolama sistemi ve şebeke bağlantısını içeren hibrit bir enerji sistemi tasarlanmış ve HOMER Pro yazılımı kullanılarak teknik ve ekonomik açıdan analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, farklı sistem konfigürasyonları için karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve şebeke destekli hibrit sistemlerin avantajları ortaya konulmuştur.

## 2. Sistem Tanıtımı

Bu çalışma kapsamında, Bursa ili Orhaneli ilçesine bağlı Kadı Mahallesi'nin elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanmasına yönelik şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız çalışma senaryolarını içeren bir hibrit enerji sistemi tasarlanmıştır. Çalışma alanı olarak Kadı Mahallesi'nin seçilmesinin temel nedeni, kırsal yerleşim bölgelerinde artan enerji talebi, elektrik şebekesine olan uzaklık ve yenilenebilir enerji kaynak potansiyelinin yüksek olmasıdır. Literatürde yer alan benzer çalışmalar incelendiğinde, kırsal bölgelerde kurulan hibrit enerji sistemlerinin hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli avantajlar sağladığı görülmektedir [1]–[3].

Tasarlanan hibrit sistem; fotovoltaiik (PV) paneller, rüzgâr türbinleri, batarya enerji depolama sistemi ve çift yönlü güç dönüştürücüden (converter) oluşmaktadır. Sistem bileşenlerinin boyutlandırılması ve optimizasyonu HOMER Pro yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, farklı senaryolar altında teknik ve ekonomik performanslar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

### 2.1. Çalışma Alanının Tanıtımı

Bu çalışmada ele alınan uygulama alanı, Bursa ili Orhaneli ilçesine bağlı Kadı Mahallesi'dir. Kadı Mahallesi, yerleşim yapısı ağırlıklı olarak müstakil konutlardan oluşan, yarı kırsal özellikler gösteren bir yerleşim bölgesidir. Bölge, hem güneş hem de rüzgâr enerjisi potansiyeli açısından değerlendirilebilir bir coğrafi konuma sahiptir.

Mahallede yaklaşık 50–100 hane bulunduğu varsayılmıştır. Elektrik tüketimi, konutların günlük yaşam ihtiyaçları dikkate alınarak modellenmiştir. Bu çalışmada, tüm mahalle için ortalama günlük elektrik tüketimi 450 kWh/gün olarak kabul edilmiştir. Yük profili, gün içindeki tüketim değişimlerini yansıtabilecek şekilde HOMER Pro yazılımı içerisinde sentetik olarak oluşturulmuştur.

Son yıllarda elektrikli araç kullanımının artması göz önünde bulundurularak, çalışma alanına 1 adet elektrikli araç şarj istasyonu eklenmiştir. Elektrikli araç şarj istasyonu için günlük 60 kWh/gün enerji tüketimi ve 22 kW tepe güç değeri kabul edilmiştir. Bu yük, esnek yük olarak modellenmiş ve sistemin yenilenebilir enerji kaynakları ile daha verimli çalışması hedeflenmiştir [1].

Çalışma alanı için oluşturulan toplam elektriksel yük; konut yükü ve elektrikli araç şarj istasyonu yükünün birleşiminden oluşmaktadır. Bu yaklaşım, literatürde yer alan kırsal ve yarı kırsal yerleşim alanları için yapılan hibrit enerji sistemi çalışmalarına benzer şekilde uygulanmıştır [2], [3].

Çalışmanın temel amacı; Kadı Mahallesi'nin mevcut ve gelecekteki elektrik ihtiyacını karşılayabilecek, yenilenebilir enerji ağırlıklı, ekonomik ve çevre dostu bir hibrit enerji sistemi tasarlamaktır. Bu kapsamda güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, batarya depolama sistemi ve şebeke bağlantısı birlikte değerlendirilmiştir.



Şekil 1. Bursa ili Orhaneli ilçesine bağlı Kadı Mahallesi'nin coğrafi konumu.

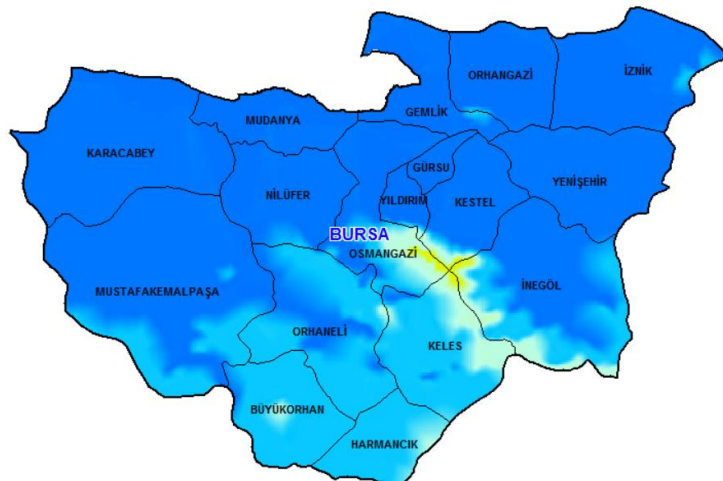
## 2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynak Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Yenilenebilir enerji sistemlerinin tasarımında, seçilen bölgeye ait güneş ve rüzgâr enerji potansiyelinin ayrıntılı olarak incelenmesi büyük önem taşımaktadır. Güneşlenme süresi, küresel yatay radyasyon, rüzgâr hızı dağılımı ve rüzgâr güç yoğunluğu gibi parametreler, kurulacak sistemin enerji üretim kapasitesini ve ekonomik fizibilitesini doğrudan etkilemektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda, hibrit enerji sistemlerinin başarısının büyük ölçüde bu parametrelerin doğru değerlendirilmesine bağlı olduğu vurgulanmaktadır [1]–[3].

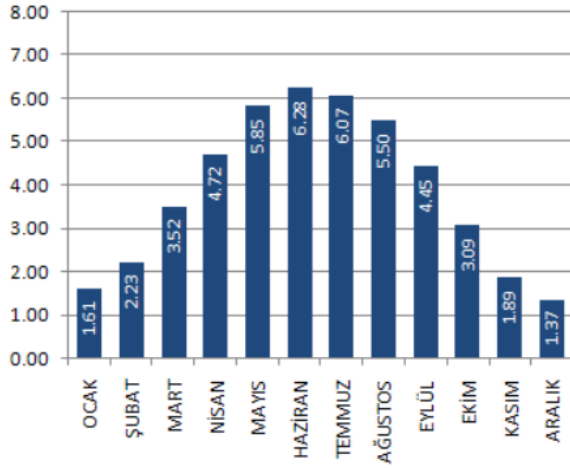
Bu çalışma kapsamında, Bursa ili Orhaneli ilçesine bağlı Kadı Mahallesi için güneş ve rüzgâr enerjisi potansiyeli ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Kullanılan meteorolojik veriler, NASA POWER veri tabanı, Türkiye Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM) atlasları ve HOMER Pro yazılımının entegre iklim verileri kullanılarak elde edilmiştir [5]–[7]. Bu veriler, sistemin yıllık enerji üretim potansiyelinin belirlenmesi ve hibrit sistem tasarımının gerekçelendirilmesi amacıyla değerlendirilmiştir.

### 2.2.1. Güneş Enerjisi Potansiyelinin İncelenmesi

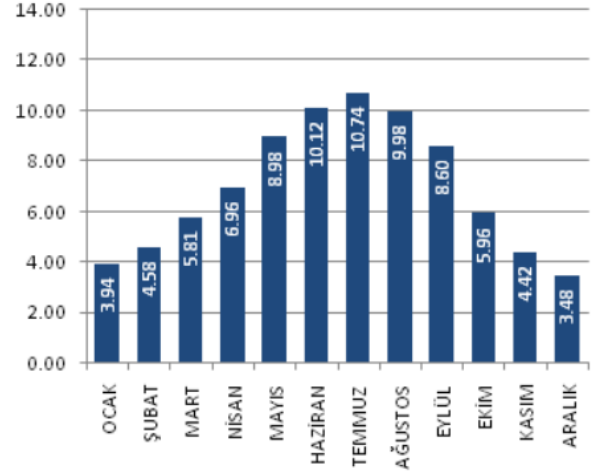
Güneş enerjisi potansiyelinin belirlenmesinde en yaygın kullanılan parametrelerden biri eşdeğer güneşlenme saati (ESH)'dir. ESH, belirli bir zaman aralığında alınan toplam güneş enerjisinin, sabit bir ışınım altında elde edilmesine karşılık gelen süreyi ifade etmektedir. Bu parametre, fotovoltaik sistemlerin enerji üretim tahminlerinde temel bir girdi olarak kullanılmaktadır [4], [5].



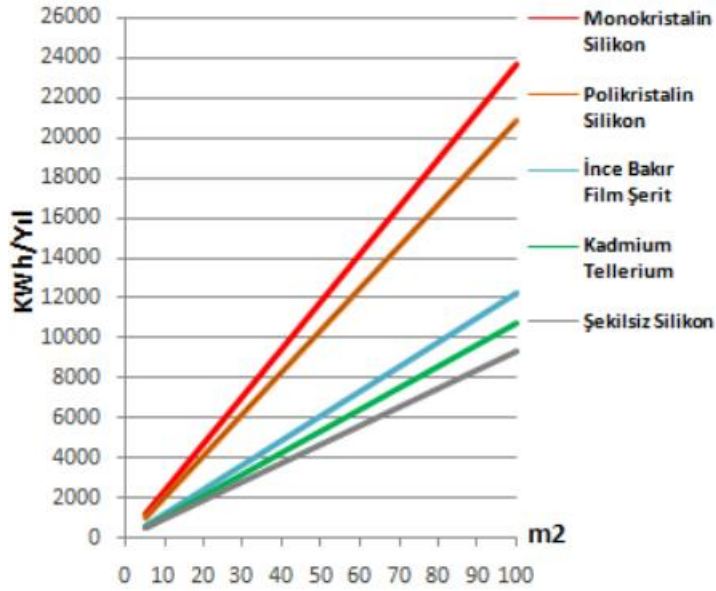
Şekil 2. Bursa Güneş Enerji Potansiyeli Haritası



Şekil 3. Orhaneli Global Radyasyon Değerleri (KWh/m2-gün)



Şekil 4. Orhaneli Güneşlenme Süreleri (Saat)

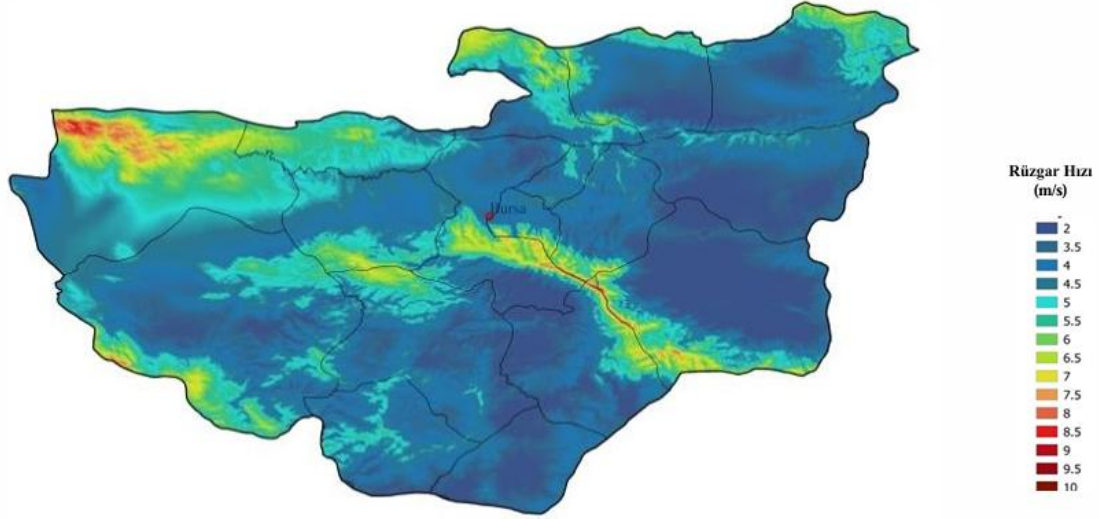


Şekil 5. Güneş Paneli Türlerine Göre Enerji Potansiyeli Grafiği

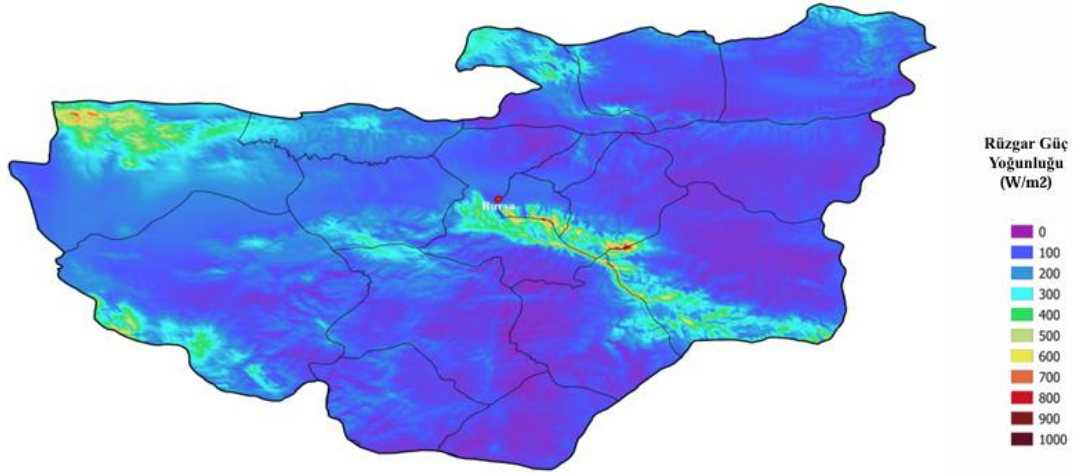
Elde edilen sonuçlara göre, çalışma alanında yaz aylarında eşdeğer güneşlenme saatlerinin belirgin şekilde arttığı, kış aylarında ise daha düşük seviyelerde seyrettiği görülmektedir. Bu durum, fotovoltaik panellerin özellikle yaz aylarında yüksek enerji üretim potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Benzer eğilimler Türkiye genelinde yapılan güneş enerjisi potansiyel çalışmalarında da rapor edilmiştir [4], [7]. Aylık toplam güneş radyasyonu değerleri incelendiğinde, bölgenin yıllık ortalama güneşlenme potansiyelinin fotovoltaik sistem kurulumu açısından uygun olduğu söylenebilir. Bu durum, PV sistemlerin hibrit yapı içerisinde ana enerji üretim kaynağı olarak kullanılmasını desteklemektedir.

### 2.2.2. Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin İncelenmesi

Rüzgâr enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesinde, ortalama rüzgâr hızı, rüzgâr hızı frekans dağılımı ve rüzgâr güç yoğunluğu parametreleri dikkate alınmıştır. Rüzgâr enerjisinden elde edilebilecek güç, rüzgâr hızının küpü ile orantılı olduğundan, hız dağılımının doğru modellenmesi sistem tasarımı açısından kritik öneme sahiptir [2], [6].



Şekil 6. Bursa Geneli Yıllık Ortalama 100 Metrede Rüzgâr Hızı Dağılımı



Şekil 7. Bursa Geneli Yıllık Ortalama 100 Metrede Güç Yoğunluğu

Analiz edilen veriler, çalışma alanında yıl boyunca belirli bir rüzgâr potansiyelinin mevcut olduğunu göstermektedir. Özellikle kış ve geçiş aylarında rüzgâr hızlarının arttığı, yaz aylarında ise güneş enerjisinin baskın olduğu gözlemlenmiştir. Bu tamamlayıcı karakter, rüzgâr ve güneş enerjisinin birlikte kullanıldığı hibrit sistemlerin tercih edilmesini desteklemektedir [1], [3].

Rüzgâr güç yoğunluğu değerleri incelendiğinde, bölgenin küçük ve orta ölçekli rüzgâr türbinleri için uygun olduğu söylenebilir. Bu nedenle çalışmada Generic G3 tipi rüzgâr türbinlerinin kullanılması tercih edilmiştir.

### **2.2.3. Hibrit Sistem Tasarımı Açısından Genel Değerlendirme**

Güneş ve rüzgâr enerjisi potansiyelinin birlikte değerlendirilmesi sonucunda, çalışma alanında bu iki kaynağın mevsimsel ve zamansal olarak birbirini tamamladığı görülmektedir. Güneş enerjisinin yaz aylarında yüksek üretim sağladığı, rüzgâr enerjisinin ise özellikle kış aylarında sisteme önemli katkı sunduğu belirlenmiştir. Bu durum, enerji arz güvenliğinin artırılması ve batarya depolama ihtiyacının azaltılması açısından hibrit sistem tasarımını avantajlı hale getirmektedir [1], [2], [8].

Bu nedenle, Kadı Mahallesi için PV–rüzgâr–batarya destekli hibrit bir enerji sisteminin teknik ve ekonomik açıdan uygun bir çözüm olduğu değerlendirilmiştir.

### **2.3. Elektriksel Yüklerin Tanımlanması**

Bu çalışmada tasarlanan hibrit enerji sisteminin doğru bir şekilde boyutlandırılabilmesi için, çalışma alanına ait elektriksel yük profilleri ayrıntılı olarak tanımlanmıştır. Elektriksel yükler, konut kaynaklı elektrik tüketimi ve elektrikli araç (EA) şarj istasyonu yükü olmak üzere iki ana grupta ele alınmıştır. Yüklerin belirlenmesinde literatürde yer alan benzer kırsal yerleşim uygulamaları ve hibrit enerji sistemi çalışmaları dikkate alınmıştır [1]–[3].

#### **2.3.1. Konut Elektrik Yükü**

Konut elektrik yükü; aydınlatma, beyaz eşyalar, küçük ev aletleri ve günlük yaşamda kullanılan diğer elektrikli cihazları kapsamaktadır. Kadı Mahallesi’nde yaklaşık 50–100 hane bulunduğu varsayılmış ve bu yerleşim için ortalama günlük elektrik tüketimi 450 kWh/gün olarak belirlenmiştir. Yük profili, gün içerisinde sabah ve akşam saatlerinde artan, gece saatlerinde ise azalan tipik bir konut tüketim karakteristiğine sahiptir.

HOMER Pro yazılımı kullanılarak oluşturulan saatlik yük profiline göre, konut yükü için maksimum talep gücü 83,55 kW olarak hesaplanmıştır. Literatürde kırsal ve yarı kırsal yerleşimler için yapılan çalışmalarda elde edilen yük değerleriyle bu sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir [2], [3].

#### **2.3.2. Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Yükü**

Elektrikli araç kullanımının artmasıyla birlikte, yerleşim alanlarında EA şarj istasyonları önemli bir elektriksel yük oluşturmaktadır. Bu çalışmada sisteme 1 adet elektrikli araç şarj istasyonu eklenmiş ve günlük enerji tüketimi 60 kWh/gün, maksimum güç talebi ise 22 kW olarak kabul edilmiştir.

Elektrikli araç şarj yükü, HOMER Pro ortamında ertelenebilir yük (deferrable load) olarak modellenmiştir. Bu yaklaşım, şarj işlemlerinin yenilenebilir enerji üretiminin yüksek olduğu zaman dilimlerine kaydırılmasına olanak tanımakta ve sistemin enerji verimliliğini artırmaktadır [1], [4]. EA yükünün sisteme dâhil edilmesi, çalışmanın güncel enerji ve ulaşım politikalarıyla uyumlu olmasını sağlamaktadır.

#### **2.3.3. Toplam Elektrik Yükü Profili**

Konut yükü ve elektrikli araç şarj istasyonu yükünün birlikte değerlendirilmesi sonucunda, sistemin toplam günlük elektrik enerjisi ihtiyacı 510 kWh/gün olarak hesaplanmıştır. Bu toplam yük, HOMER Pro yazılımında saatlik zaman adımlarıyla modellenmiş ve hibrit enerji sisteminin tasarım ve optimizasyon aşamalarında temel girdi olarak kullanılmıştır.

Yüklerin ayrıntılı ve gerçekçi şekilde tanımlanması, hibrit enerji sistemlerinin teknik performansı ve ekonomik analiz sonuçları üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Bu

nedenle, çalışmada yük profilleri ayrı ayrı ele alınmış ve sistem tasarımı bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir [1], [2].

#### 2.4. Hibrit Enerji Sisteminin Genel Yapısı

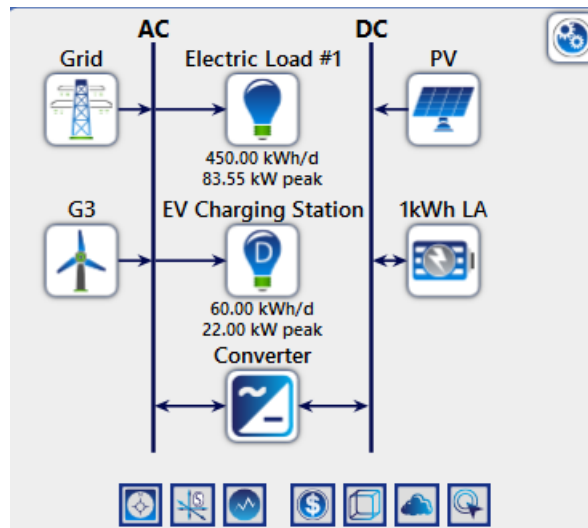
Bu çalışmada ele alınan hibrit enerji sistemi; fotovoltaik (PV) paneller, rüzgâr türbinleri, batarya enerji depolama sistemi, güç dönüştürücü (converter) ve elektrik şebekesi bileşenlerinden oluşmaktadır. Sistem, hem konut yükünü hem de elektrikli araç şarj istasyonu yükünü karşılayabilecek şekilde şebeke bağlantılı hibrit mikroşebeke yapısında tasarlanmıştır.

Fotovoltaik paneller ve rüzgâr türbinleri, sistemin temel yenilenebilir enerji üretim kaynaklarını oluşturmaktadır. Güneş enerjisi özellikle yaz aylarında yüksek üretim potansiyeli sunarken, rüzgâr enerjisi yıl boyunca daha dengeli bir üretim profili sağlamaktadır. Bu iki kaynağın birlikte kullanılması, yenilenebilir enerji üretimindeki süreksizliği azaltarak sistemin güvenilirliğini artırmaktadır [2], [3].

Yenilenebilir enerji üretiminin yükten fazla olduğu zaman dilimlerinde üretilen enerji, batarya depolama sistemi aracılığıyla depolanmaktadır. Bataryalar, üretimin yetersiz olduğu saatlerde sisteme enerji sağlayarak yük sürekliliğini garanti altına almaktadır. Bu durum, özellikle elektrikli araç şarj istasyonlarının ani güç taleplerinin karşılanması açısından kritik öneme sahiptir [1].

Sistemde yer alan güç dönüştürücü (converter), doğru akım (DC) ve alternatif akım (AC) bileşenleri arasındaki enerji dönüşümünü sağlamaktadır. PV paneller ve batarya sistemi DC bara üzerinde çalışırken, konut yükleri, EA şarj istasyonu ve rüzgâr türbinleri AC bara üzerinden beslenmektedir. Converter sayesinde sistem bileşenleri arasında uyumlu ve esnek bir enerji akışı sağlanmaktadır.

Elektrik şebekesi, sistemde destekleyici bir kaynak olarak tanımlanmıştır. Yenilenebilir enerji üretiminin ve batarya kapasitesinin yetersiz kaldığı durumlarda şebekeden enerji temin edilmekte; üretimin fazla olduğu zamanlarda ise şebekeye enerji aktarımı mümkün olmaktadır. Bu yapı, sistemin kesintisiz çalışmasını sağlarken yatırım ve işletme maliyetlerinin optimize edilmesine katkı sağlamaktadır [4], [8].



Şekil 8. Hibrit Enerji Sisteminin Genel Yapısı

### 3. Analiz ve Yöntem

Bu çalışmada, Bursa ili Orhaneli ilçesine bağlı Kadı Mahallesi için tasarlanan hibrit enerji sisteminin teknik ve ekonomik analizi HOMER Pro Microgrid Analysis Tool kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, sistemin saatlik enerji dengesi bir yıl boyunca hesaplanmış; yenilenebilir enerji üretimi, enerji depolama davranışı ve şebeke etkileşimi birlikte değerlendirilmiştir. Kullanılan yöntem, literatürde hibrit enerji sistemlerinin optimizasyonu için yaygın olarak tercih edilen HOMER tabanlı analiz yaklaşımıyla uyumludur.

#### 3.1. Kullanılan Sistem Bileşenleri ve Model Seçimi

Bu çalışmada kullanılan tüm sistem bileşenleri, HOMER Pro yazılımının standart (generic) bileşen kütüphanesinden seçilmiştir. Generic bileşenlerin tercih edilmesinin temel nedeni, belirli bir marka veya üreticiye bağımlı olmadan sistemin genel davranışının ve ekonomik performansının analiz edilebilmesidir. Bu yaklaşım, akademik çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

#### 3.2. Fotovoltaik (PV) Sistem Modeli

Fotovoltaik sistem, HOMER Pro yazılımında yer alan Generic PV modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Generic PV modeli, belirli bir üreticiye bağılı olmaksızın kristal silikon tabanlı ticari PV panellerin ortalama performansını temsil etmektedir. Bu model, günümüzde yaygın olarak kullanılan 550–600 Wp sınıfı monokristal panellere (örneğin *Trina Solar Vertex* veya *LONGi Hi-MO* serileri) karşılık gelmektedir.

Analizlerde PV sistemi için farklı kurulu güç değerleri değerlendirilmiş ve optimizasyon sonucunda 200 kW toplam kurulu güce sahip PV sisteminin uygun olduğu belirlenmiştir.

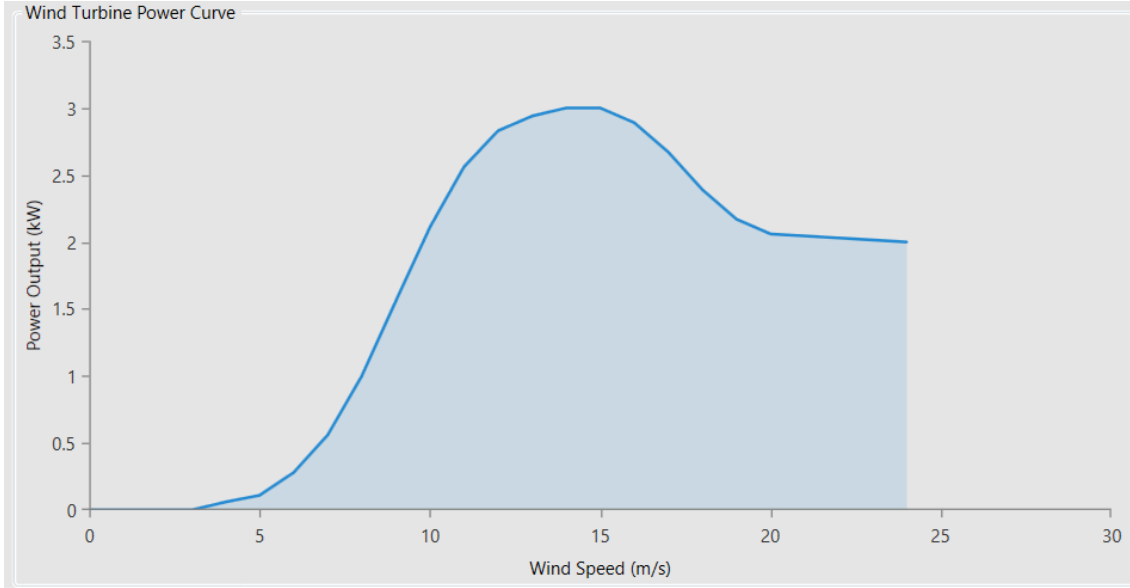
**Tablo 1.** Fotovoltaik Sistem İçin Kullanılan Model ve Parametreler

Parametre	Değer
HOMER modeli	Generic PV
Temsilî ticari karşılık	Trina Solar Vertex 550 Wp / LONGi Hi-MO 5
Birim nominal güç	1 kW (HOMER)
Toplam kurulu güç	200 kW
Derating faktörü	%80
Sistem ömrü	25 yıl
Yatırım / O&M maliyeti	HOMER varsayılan

### 3.3. Rüzgâr Türbini Modeli

Rüzgâr enerjisi üretimi için HOMER Pro kütüphanesinde bulunan Generic G3 tipi rüzgâr türbini kullanılmıştır. Generic G3 modeli, 3 kW nominal güce sahip küçük ölçekli ticari rüzgâr türbinlerinin ortalama güç eğrisini temsil etmektedir. Bu model, literatürde ve uygulamada yaygın olarak kullanılan SW Whisper 500, Bornay 3000 ve benzeri türbinlerle karakteristik açıdan benzerlik göstermektedir.

Bu çalışmada analizlerde 20 adet rüzgâr türbini değerlendirilmiş ve toplam rüzgâr kurulu gücü 60 kW olarak belirlenmiştir.



Şekil 9. 3 kW Nominal Güce Sahip Rüzgâr Türbinine Ait Güç Çıkış Eğrisi (HOMER PRO)

Tablo 2. Rüzgâr Türbini İçin Kullanılan Model ve Parametreler

Parametre	Değer
HOMER modeli	Generic G3
Temsilî ticari karşılık	SW Whisper 500 / Bornay 3000
Nominal güç	3 kW
Türbin sayısı	20
Toplam kurulu güç	60 kW
Kule yüksekliği	17 metre
Sistem ömrü	20 yıl

### 3.4. Batarya Enerji Depolama Sistemi Modeli

Enerji depolama sistemi olarak HOMER Pro yazılımında yer alan Generic 1 kWh Lead-Acid batarya modeli kullanılmıştır. Bu model, kurşun-asit tabanlı ticari akü sistemlerinin ortalama davranışını temsil etmektedir. Generic batarya modeli, uygulamada yaygın olarak kullanılan OPzS / OPzV endüstriyel akü sistemleri veya Trojan L16 gibi bataryalara karşılık gelmektedir.

Analizlerde toplam 1000 kWh batarya kapasitesi değerlendirilmiş ve bataryalar yenilenebilir üretimin yetersiz olduğu zaman dilimlerinde yük sürekliliğini sağlamak amacıyla kullanılmıştır.

**Tablo 3.** Batarya Enerji Depolama Sistemi İçin Kullanılan Model ve Parametreler

Parametre	Değer
HOMER modeli	Generic 1 kWh Lead-Acid
Temsilî ticari karşılık	OPzS / OPzV endüstriyel aküler
Toplam kapasite	1000 kWh
Minimum SOC	HOMER varsayılan
Yuvarlak çevrim verimi	HOMER varsayılan
Sistem ömrü	HOMER varsayılan

### 3.5. Güç Dönüştürücü (Converter) Modeli

DC ve AC bileşenler arasındaki enerji dönüşümü için 50 kW kapasiteli çift yönlü güç dönüştürücü (converter) kullanılmıştır. Converter modeli, HOMER Pro'da generic olarak tanımlanmış olup ticari olarak SMA Sunny Island, Victron Quattro gibi inverter/şarj cihazlarının genel performansını temsil etmektedir.

**Tablo 4.** Güç dönüştürücü İçin Kullanılan Model ve Parametreler

Parametre	Değer
HOMER modeli	Generic Converter
Temsilî ticari karşılık	SMA Sunny Island / Victron Quattro
Nominal güç	50 kW
Verim	%95
Sistem ömrü	15 yıl

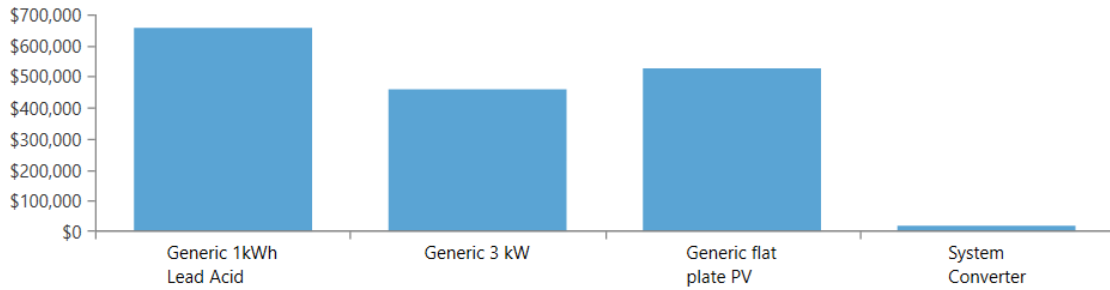
### 3.6. Elektrik Şebekesi Modeli

Elektrik şebekesi, sistemde destekleyici enerji kaynağı olarak modellenmiştir. Şebeke, Türkiye alçak/orta gerilim dağıtım sistemini temsil edecek şekilde HOMER Pro ortamında tanımlanmıştır. Bu kapsamda, elektrik şebekesinden enerji alım fiyatı 0,15 \$/kWh, şebekeye satış fiyatı ise 0,05 \$/kWh olarak kabul edilmiş ve analizler bu değerler üzerinden gerçekleştirilmiştir.

#### 4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu bölümde, HOMER Pro yazılımı kullanılarak tasarlanan hibrit enerji sistemine ait simülasyon ve optimizasyon sonuçları sunulmakta ve elde edilen bulgular teknik ve ekonomik açıdan değerlendirilmektedir. Fotovoltaik sistem, rüzgâr türbini, batarya enerji depolama birimi ve güç dönüştürücü bileşenlerinden oluşan sistemin performansı; maliyet dağılımı, nakit akışı, elektrik üretim profili ve şebeke uzatma karşılaştırması gibi kriterler üzerinden analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sistemin uzun vadeli ekonomik fizibilitesini ve yenilenebilir enerji tabanlı çözümlerin kırsal yerleşimler için uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır

##### 4.1. Toplam Sistem Maliyet Dağılımı

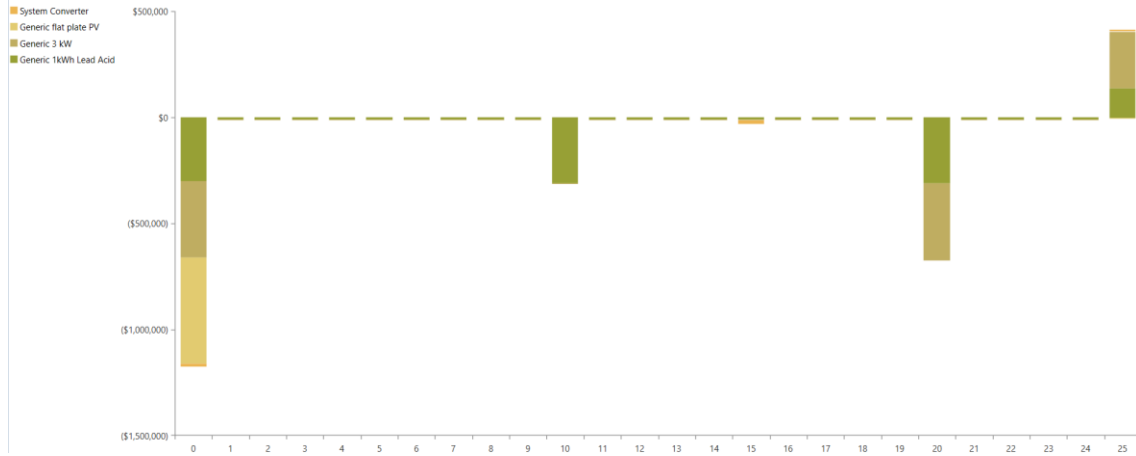


Component	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$)	Fuel (\$)	Salvage (\$)	Total (\$)
Generic 1kWh Lead Acid	\$300,000.00	\$265,031.29	\$129,275.17	\$0.00	(\$35,933.68)	\$658,372.78
Generic 3 kW	\$360,000.00	\$114,770.65	\$46,539.06	\$0.00	(\$64,680.62)	\$456,629.09
Generic flat plate PV	\$500,000.00	\$0.00	\$25,855.03	\$0.00	\$0.00	\$525,855.03
System Converter	\$15,000.00	\$6,364.11	\$0.00	\$0.00	(\$1,197.79)	\$20,166.32
System	\$1,175,000.00	\$386,166.04	\$201,669.26	\$0.00	(\$101,812.09)	\$1,661,023.21

**Şekil 10.** Hibrit Enerji Sistemini Oluşturan Bileşenlerin NPC Bazında Toplam Maliyet Dağılımı

Bu şekil, HOMER Pro yazılımı kullanılarak optimize edilen hibrit enerji sisteminde yer alan fotovoltaik (PV) sistem, rüzgâr türbini, batarya grubu ve güç dönüştürücü bileşenlerinin net bugünkü değer (NPC) cinsinden maliyet katkılarını göstermektedir. Şekil 10 incelendiğinde, sistem toplam maliyetinin en büyük kısmını batarya grubunun oluşturduğu görülmektedir. Bu durum, enerji sürekliliğinin sağlanabilmesi için yüksek kapasiteli enerji depolama ihtiyacının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Fotovoltaik sistem ikinci en yüksek maliyet kalemi olup, rüzgâr türbini ve güç dönüştürücü bileşenlerinin toplam maliyet içindeki payları görece daha düşüktür. Bu sonuçlar, yenilenebilir enerji tabanlı şebekeden bağımsız sistemlerde depolama maliyetlerinin kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

## 4.2. Sistem Bileşenlerine Göre Nakit Akışı Analizi



Şekil 11. Sistemin Yıllık Proje Ömrü ve Fiyat Analizi

Şekil 11 de, HOMER Pro yazılımı kullanılarak tasarlanan hibrit enerji sisteminin 25 yıllık proje ömrü boyunca bileşen bazında nakit akışı (cash flow) dağılımı gösterilmektedir. Grafik, sistemin başlangıç aşamasında yüksek sermaye yatırımı gerektirdiğini, ancak zaman içerisinde işletme süreciyle birlikte ekonomik olarak dengelendiğini ortaya koymaktadır.

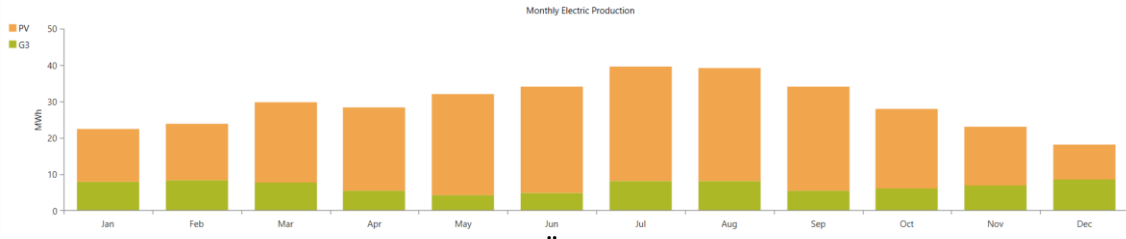
Projenin ilk yıllarında görülen belirgin negatif nakit akışı, fotovoltaik sistem, rüzgâr türbini ve özellikle batarya grubuna ait yüksek ilk yatırım maliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Bu durum, yenilenebilir enerjiye dayalı hibrit sistemlerin karakteristik bir özelliği olup, yatırım maliyetlerinin büyük ölçüde proje başlangıcında yoğunlaşmasıyla açıklanabilir.

İlerleyen yıllarda, sistemin fosil yakıt tüketimi olmaksızın çalışması ve düşük işletme-bakım maliyetlerine sahip olması sayesinde yıllık giderlerin sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu süreçte, yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanan elektrik üretimi sistemin enerji ihtiyacını karşılamakta ve ilave yakıt maliyeti oluşmamaktadır. Böylece, sistem zamanla başlangıç yatırım maliyetlerini telafi etmeye başlamaktadır.

Proje ömrünün sonuna yaklaşıldığında, bazı bileşenlerin hurda (salvage) değerlerinin nakit akışına olumlu katkı sağladığı görülmektedir. Bu durum, toplam net bugünkü maliyetin (NPC) azalmasına ve sistemin ekonomik açıdan daha avantajlı hale gelmesine katkıda bulunmaktadır. Sonuç olarak, 25 yıllık analiz süresi sonunda hibrit enerji sisteminin toplam ekonomik performansının pozitif yönde olduğu ve sistemin uzun vadede kârlı bir yatırım alternatifi sunduğu belirlenmiştir.

Bu bulgular, başlangıç maliyeti yüksek olmasına rağmen yenilenebilir enerji tabanlı hibrit sistemlerin uzun vadeli projelerde ekonomik açıdan sürdürülebilir ve uygulanabilir bir çözüm olduğunu göstermektedir.

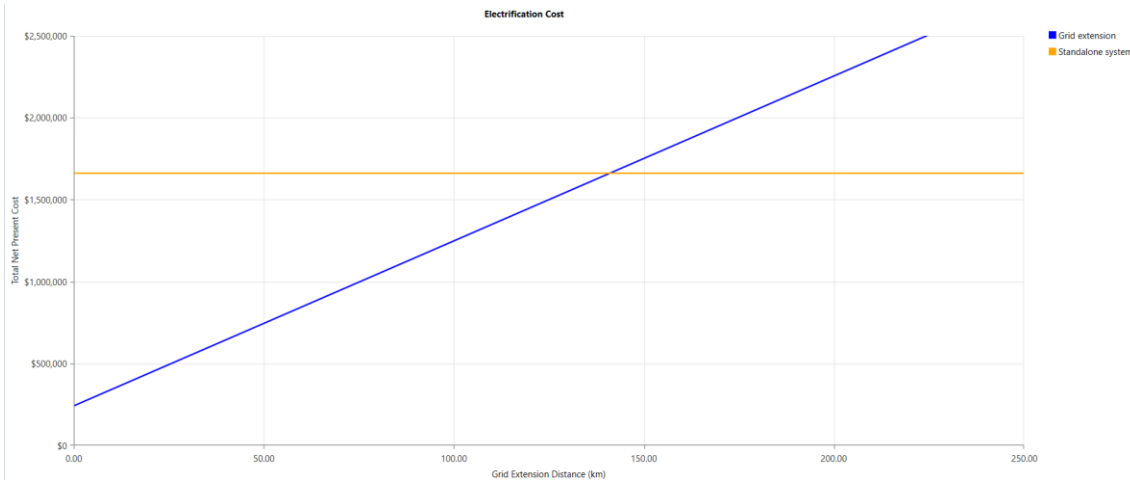
### 4.3. Yıllık Elektrik Üretimi ve Tüketimi Dağılımı



Şekil 12. Sistemin Aylık Elektrik Üretimini Kaynaklara Göre Dağılımı

Bu şekil, hibrit enerji sisteminde fotovoltaik (PV) paneller ve rüzgâr türbinleri tarafından yıl boyunca üretilen aylık elektrik enerjisinin dağılımını göstermektedir. Yaz aylarında güneşlenme süresinin artmasına bağlı olarak PV kaynaklı üretimin belirgin şekilde yükseldiği, kış aylarında ise rüzgâr enerjisinin sistem üretimine görece daha fazla katkı sağladığı görülmektedir. Bu tamamlayıcı üretim karakteristiği, sistemin yıl boyunca yük talebini daha dengeli ve güvenilir bir şekilde karşılamasına olanak sağlamaktadır.

### 4.4. Şebeke Uzatma – Bağımsız Sistem Ekonomik Karşılaştırması



Şekil 13. Sistemin Şebeke Bağlantılı ve Bağımsız Sistemlerin NPC Karşılaştırması

Grafiğe göre şebeke uzatma mesafesinin artmasına bağlı olarak şebeke bağlantılı sistem ile şebekeden bağımsız hibrit enerji sisteminin toplam net bugünkü maliyetlerinin değişimini göstermektedir. Şebeke uzatma maliyeti mesafe ile doğrusal olarak artarken, bağımsız sistemin toplam maliyeti mesafeden bağımsız olarak sabit kalmaktadır. Analiz sonucunda yaklaşık 141 km şebeke uzatma mesafesinden sonra şebekeden bağımsız hibrit sistemin ekonomik açıdan daha avantajlı hale geldiği belirlenmiştir. Bu durum, kırsal ve şebekeye uzak yerleşimler için yenilenebilir enerji tabanlı bağımsız sistemlerin uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır.

## 5. Sonuç

Bu çalışmada, Bursa ili Orhaneli ilçesine bağlı Kadı Mahallesi için konut yükü ve elektrikli araç şarj istasyonunu kapsayan şebeke bağlantılı hibrit yenilenebilir enerji sistemi tasarlanmış ve HOMER Pro yazılımı kullanılarak teknik ve ekonomik açıdan optimize edilmiştir. Sistem; fotovoltaik paneller, rüzgâr türbinleri, batarya enerji depolama sistemi, güç dönüştürücü ve elektrik şebekesinden oluşacak şekilde modellenmiştir.

Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda, 200 kW kurulu güce sahip fotovoltaik sistem, 60 kW rüzgâr türbini kapasitesi, 1000 kWh batarya depolama kapasitesi ve 50 kW gücünde dönüştürücü içeren yapı en uygun sistem konfigürasyonu olarak belirlenmiştir. Bu sistem için toplam net bugünkü maliyet (NPC) yaklaşık 1,66 milyon dolar, birim enerji maliyeti (LCOE) ise 0,705 \$/kWh olarak hesaplanmıştır.

Aylık üretim analizleri, güneş ve rüzgâr enerjisinin mevsimsel olarak birbirini tamamladığını ve bu sayede sistemin yıl boyunca yük talebini güvenilir şekilde karşıladığını göstermiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam üretimdeki payının %100 olması, sistemin çevresel sürdürülebilirliğini ön plana çıkarmaktadır.

Şebeke uzatma analizi sonucunda, yaklaşık 141 km mesafeden sonra şebekeden bağımsız hibrit sistemlerin ekonomik açıdan daha avantajlı hale geldiği belirlenmiştir. Bu bulgu, özellikle kırsal ve şebekeye uzak yerleşim alanlarında yenilenebilir enerji tabanlı mikro şebeke çözümlerinin uygulanabilirliğini açıkça ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, tasarlanan hibrit enerji sistemi; teknik yeterlilik, ekonomik fizibilite ve çevresel sürdürülebilirlik açısından başarılı bir çözüm sunmaktadır. Gelecek çalışmalarda, batarya teknolojilerinin çeşitlendirilmesi, hidrojen depolama entegrasyonu ve farklı elektrikli araç şarj senaryolarının incelenmesi sistem performansını daha ileri seviyeye taşıyabilir.

## 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 Açidan 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].Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons.
- [6].Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons.
- [7].Hegy, B., Stackhouse, P. W., Taylor, P., & Patadia, F. (2024, January). Nasa POWER: providing present and future climate services based on NASA data for the energy, agricultural, and sustainable buildings communities. In 104th American Meteorological Society (AMS) Annual Meeting.
- [8].Energy, H. O. M. E. R. (2023). HOMER pro version 3.16. 2 user manual. *HOMER Energy: Boulder, CO, USA*.
- [9].Christensen, T. B. K., Lund, H., & Sorknæs, P. (2024). The role of thermal energy storages in future smart energy systems. *Energy*, 313, 133948.