



Bursa/Yıldırım'da Elektrikli Araç Şarj Uygulamaları için Şebekeye Bağlı Hibrit Enerji Sisteminin Teknik-Ekonomik Değerlendirmesi

Techno-Economic Assessment of a Grid-Connected Hybrid Energy System for Electric Vehicle Charging Applications in Bursa/Yıldırım

Nazım Habeş

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

Özet

Bu çalışma kapsamında, Bursa ili Yıldırım ilçesinde bulunan bir konutun elektrikli araç enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla hibrit bir enerji sistemi tasarımı ve analizi gerçekleştirilmiştir. Sistem, günlük toplam 70 kWh enerji tüketimine sahip iki elektrikli aracın şarj ihtiyacını karşılayacak şekilde planlanmış olup, bu amaçla fotovoltaik paneller ve akü destekli hibrit bir enerji sistemi önerilmiştir. Elektrikli araç şarj istasyonlarının günlük enerji tüketimi 11,67 kWh, yıllık toplam enerji tüketimi ise 25.451 kWh olarak hesaplanmıştır.

Sistemin tasarımı ve performans analizi için HOMER Grid yazılımı kullanılmış; bölgenin güneş radyasyonu potansiyeli, meteorolojik verileri, enerji yük profilleri ve elektrik tarifeleri detaylı olarak değerlendirilmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda, sistemin yıllık toplam enerji üretim kapasitesi 36.983 kWh olarak belirlenmiş ve enerji üretimi ile tüketimi arasındaki dengenin sürdürülebilir bir enerji altyapısı oluşturduğu görülmüştür. Ekonomik analizler doğrultusunda, sistemin toplam yatırım maliyeti 256.545,45 ₺, işletme maliyeti 5.127,87 ve geri ödeme süresi 7,8 yıl olarak hesaplanmıştır. Mevsimsel güneş radyasyonu değişimlerinin enerji üretimi üzerindeki etkileri incelenmiş ve sistemin yıl boyunca verimli bir şekilde çalıştığı tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, hibrit enerji sistemlerinin yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama çözümlerini bir arada kullanarak elektrikli araç şarj altyapılarını ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir hale getirdiğini göstermektedir.

Bursa Yıldırım ilçesi gibi orta seviyede güneş enerjisi potansiyeline sahip bölgelerde dahi bu tür hibrit sistemlerin etkin bir çözüm sunduğu ortaya konmuştur. Bu çalışma, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımının elektrikli araç altyapısının geliştirilmesi ve enerji bağımsızlığının artırılması açısından önemli bir yaklaşım

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

sunduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Elektrikli Araç Şarj İstasyonu, Hibrit Enerji Sistemleri, Fotovoltaik Sistemler, Enerji Depolama, Tekno-Ekonomik Analiz, HOMER Grid, Şebeke Bağlantılı Sistemler, Sürdürülebilir Enerji.

Abstract

In this study, the design and analysis of a hybrid energy system were carried out to meet the electric vehicle energy needs of a residence located in the Yıldırım district of Bursa province. The system was planned to meet the charging requirements of two electric vehicles with a total daily energy consumption of 70 kWh; for this purpose, a hybrid energy system supported by photovoltaic panels and batteries was proposed. The daily energy consumption of the electric vehicle charging stations was calculated as 11.67 kWh, and the total annual energy consumption as 25,451 kWh.

HOMER Grid software was utilized for the design and performance analysis of the system, where the region's solar radiation potential, meteorological data, energy load profiles, and electricity tariffs were evaluated in detail. As a result of the simulations, the total annual energy production capacity of the system was determined to be 36,983 kWh, and it was observed that the balance between energy production and consumption established a sustainable energy infrastructure.

According to the economic analyses, the total investment cost of the system was calculated as 256,545.45 ₺, the operating cost as 221,188.01 ₺, and the payback period as 7.8 years. The effects of seasonal solar radiation variations on energy production were examined, and it was determined that the system operates efficiently throughout the year. The obtained results indicate that hybrid energy systems make electric vehicle charging infrastructures economically and environmentally sustainable by combining renewable energy sources and energy storage solutions. It has been demonstrated that such hybrid systems offer an effective solution even in regions with medium-level solar energy potential, such as the Yıldırım district of Bursa. This study shows that the effective use of renewable energy sources presents a significant approach for developing electric vehicle infrastructure and increasing energy independence.

Keywords: Electric Vehicle Charging Station, Hybrid Energy Systems, Photovoltaic Systems, Energy Storage, Techno-Economic Analysis, HOMER Grid, Grid-Connected Systems, Sustainable Energy.

1. Giriş

Günümüzde artan nüfus, kentleşme ve ulaşım ihtiyacına paralel olarak enerji tüketimi hızla yükselmekte, bu durum fosil yakıt kaynaklı çevresel sorunları daha da belirgin hâle getirmektedir. Özellikle ulaşım sektörünün küresel sera gazı salımlarındaki payının yüksek olması, elektrikli araçların (EA) sürdürülebilir ulaşım açısından önemli bir alternatif olarak öne çıkmasına neden olmuştur. Ancak elektrikli araçların yaygınlaşması, mevcut elektrik şebekeleri üzerinde ek yük oluşturmakta ve bu yükün yönetilebilir hâle getirilmesi için yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre şarj altyapılarına duyulan ihtiyacı artırmaktadır [1].

Yenilenebilir enerji tabanlı hibrit sistemler; güneş, rüzgâr ve enerji depolama bileşenlerini bir arada kullanarak hem şebeke üzerindeki yükü azaltmakta hem de enerji arz güvenliğini artırmaktadır. Bu kapsamda yapılan çalışmalar, özellikle fotovoltaik

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

(PV) sistemlerin akü destekli yapılarla birlikte kullanıldığında elektrikli araç şarj uygulamalarında teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilir çözümler sunduğunu göstermektedir [2].

Hibrit enerji sistemlerinin performansı, sistem bileşenlerinin doğru boyutlandırılmasına ve bölgenin meteorolojik verilerinin doğru analiz edilmesine doğrudan bağlıdır.

Literatürde, konut yükleri ile ulaşım enerjisi ihtiyacını birlikte ele alan çalışmalar sınırlı olmakla birlikte, bu alandaki öncü çalışmalardan biri Sunay Türkdoğan tarafından gerçekleştirilmiştir. Söz konusu çalışmalarda, yalnızca yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı hibrit sistemlerin hem konut elektrik yükünü hem de ulaşım amaçlı enerji ihtiyacını karşılayabildiği, HOMER yazılımı kullanılarak teknik ve ekonomik açıdan ayrıntılı biçimde ortaya konmuştur [3].

Ayrıca Sunay Türkdoğan ve çalışma arkadaşları tarafından yapılan farklı bir çalışmada, şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemlerinin kırsal ve yarı-kırsal bölgelerde uygulanabilirliği analiz edilmiş ve akü teknolojisinin sistem maliyetleri üzerindeki belirleyici etkisi vurgulanmıştır [4].

Elektrikli araç şarj altyapıları özelinde yapılan araştırmalar, yenilenebilir enerji destekli hibrit şarj istasyonlarının yalnızca çevresel fayda sağlamakla kalmayıp aynı zamanda uzun vadede ekonomik avantajlar sunduğunu da göstermektedir [5].

Bununla birlikte, sistemlerin yerel koşullara göre tasarlanması büyük önem taşımaktadır. Bursa ili gibi sanayi yoğunluğu yüksek ve elektrik talebi sürekli artan bölgelerde, ilçe bazlı enerji potansiyelinin dikkate alınması daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır [6].

Bu çalışmada, Bursa ili Yıldırım ilçesinde yer alan bir konut için elektrikli araç şarj ihtiyacını karşılamaya yönelik fotovoltaik ve akü destekli hibrit bir enerji sisteminin tasarımı ve analizi gerçekleştirilmiştir. Sistem tasarımında bölgeye ait güneş radyasyonu verileri, yük profilleri ve ekonomik parametreler dikkate alınmış; analizler HOMER Grid yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Çalışma, Sunay Türkdoğan'ın literatürde ortaya koyduğu konut ve ulaşım yüklerinin birlikte ele alındığı hibrit sistem yaklaşımını temel almakta olup, bu yaklaşımı kentsel bir ilçe ölçeğinde uygulayarak literatüre özgün bir katkı sunmayı amaçlamaktadır [3–6].

2. Sistem Tanıtımı

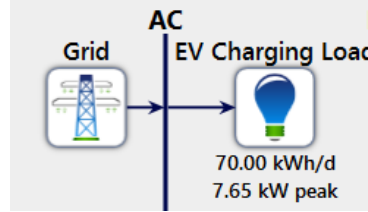
Bu çalışmada, Bursa ili Yıldırım ilçesinde bulunan bir konutta elektrikli araçların şarj ihtiyacını karşılamak amacıyla şebeke bağlantılı hibrit bir enerji sistemi tasarlanmış ve HOMER Pro yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Konutta iki adet elektrikli aracın bulunduğu kabul edilmiş ve bu araçlara ait toplam günlük şarj enerji ihtiyacı 70 kWh olarak belirlenmiştir.

Elektrikli araç şarj istasyonu, HOMER Pro ortamında “EV Charging Load” olarak modellenmiştir. Bu yaklaşımda şarj istasyonu, ayrı bir fiziksel ekipman olarak değil, sisteme bağlı bir elektrik yükü şeklinde ele alınmıştır. Şarj yükü, günlük enerji tüketimi ve saatlik kullanım profiline göre tanımlanmış olup, maksimum güç kapasitesi 24 kW olarak kabul edilmiştir.

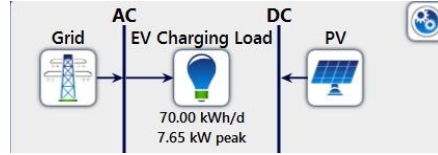
Tasarlanan sistem; şebeke, 25 kW kapasiteli fotovoltaik panel sistemi, 40 kWh kapasiteli akü grubu ve 15 kW'lık konvertörden oluşmaktadır. Sistem, yük takibi (Load Following)

kontrol stratejisi ile çalışmakta olup, güneş enerjisinin yetersiz kaldığı durumlarda şebeke desteği ile elektrikli araçların şarjı kesintisiz şekilde sağlanmaktadır.

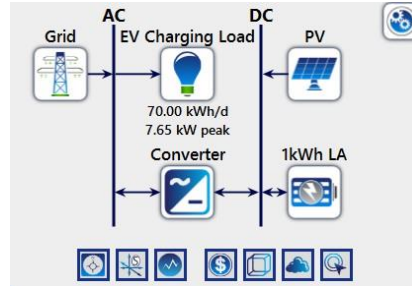
Farklı enerji kaynakları ve elektrik tarifeleri dikkate alınarak altı farklı senaryo oluşturulmuş ve bu senaryolar teknik ve ekonomik açıdan karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, fotovoltaik ve akü destekli hibrit yapının elektrikli araç şarjı için ekonomik ve sürdürülebilir bir çözüm sunduğunu göstermektedir.



Şekil 1. Senaryo 1 Tek Zamanlı ve Senaryo 4 Üç Zamanlı Modeli



Şekil 2. Senaryo 2 Tek Zamanlı ve Senaryo 5 Üç Zamanlı Modeli



3. Analiz ve Yöntem

Bu çalışmada ele alınan senaryolar, enerji kaynağı yapısı ve elektrik tarifesine göre karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Senaryo 1 ve Senaryo 4'te elektrikli araç şarj yükü yalnızca **şebekeden** karşılanmakta olup, herhangi bir yenilenebilir enerji kaynağı veya enerji depolama sistemi kullanılmamıştır. Bu senaryolar, sistemin referans durumu olarak değerlendirilmiştir.

Senaryo 2 ve Senaryo 5'te ise sisteme fotovoltaik (PV) panel ve inverter eklenerek yenilenebilir enerji destekli bir yapı oluşturulmuştur. Bu senaryolarda elektrikli araçların şarj ihtiyacının bir kısmı güneş enerjisinden karşılanmakta, PV üretiminin yetersiz kaldığı durumlarda ise şebeke desteği sağlanmaktadır.

Senaryo 3 ve Senaryo 6'da, PV sistemine ek olarak akü enerji depolama grubu da sisteme dahil edilmiştir. Bu yapı sayesinde gündüz saatlerinde üretilen fazla güneş enerjisi akülerde depolanmakta ve daha sonra elektrikli araçların şarjında veya şebeke elektrik fiyatlarının yüksek olduğu zaman dilimlerinde kullanılmaktadır. Böylece

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

şebeke bağımlılığı azaltılarak sistemin hem ekonomik hem de enerji yönetimi açısından daha verimli çalışması hedeflenmiştir.

Sistemin Yükleri

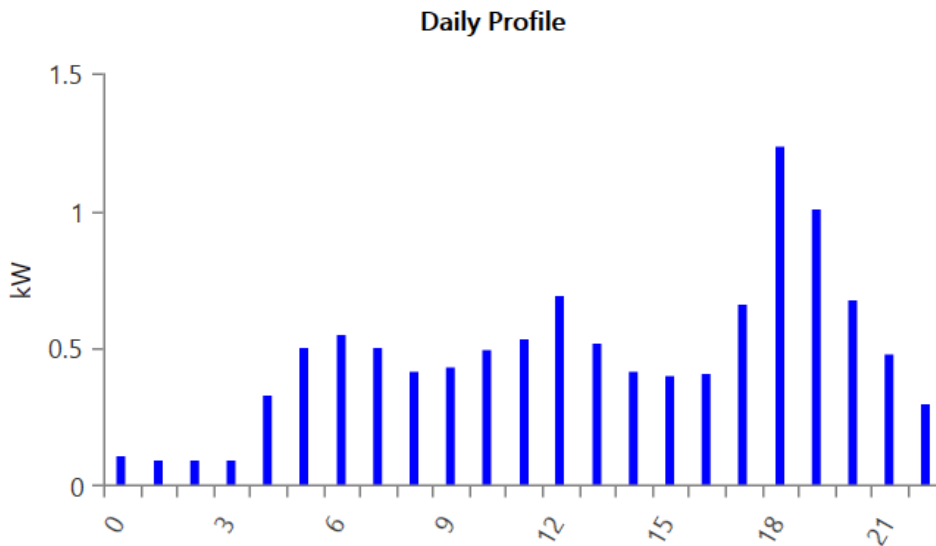
Bu çalışmada Bursa ilinin Yıldırım ilçesinde yer alan bir konutta kullanılan elektrikli araç şarj sisteminin yük profili incelenmiştir. Konutta bulunan elektrikli araçlara ait şarj güçleri ve günlük kullanım süreleri esas alınarak enerji tüketimi hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda elektrikli araçların toplam günlük enerji tüketimi 70 kWh olarak belirlenmiştir.

Elektrikli araçların şarj işlemleri ağırlıklı olarak gece saatlerinde, yaklaşık 23:00 – 04:00 zaman aralığında gerçekleştirilmektedir. Bu durum, hem kullanıcı alışkanlıkları hem de şebeke yükünü dengelemek amacıyla tercih edilmiştir.

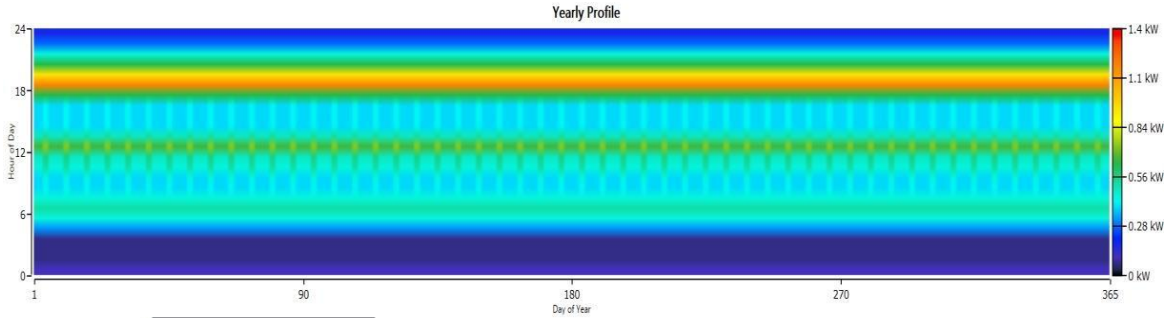
Şekil 3’de elektrikli araçlara ait günlük yük profili verilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere şarj yükü belirli saatlerde yoğunlaşmakta, günün diğer saatlerinde ise düşük seviyede kalmaktadır.

Şekil 4’te yıllık yük profili gösterilmektedir. Yıllık dağılım incelendiğinde, elektrikli araç şarj yükünün yıl boyunca benzer bir karakteristik sergilediği ve mevsimsel olarak büyük bir değişim göstermediği görülmektedir.

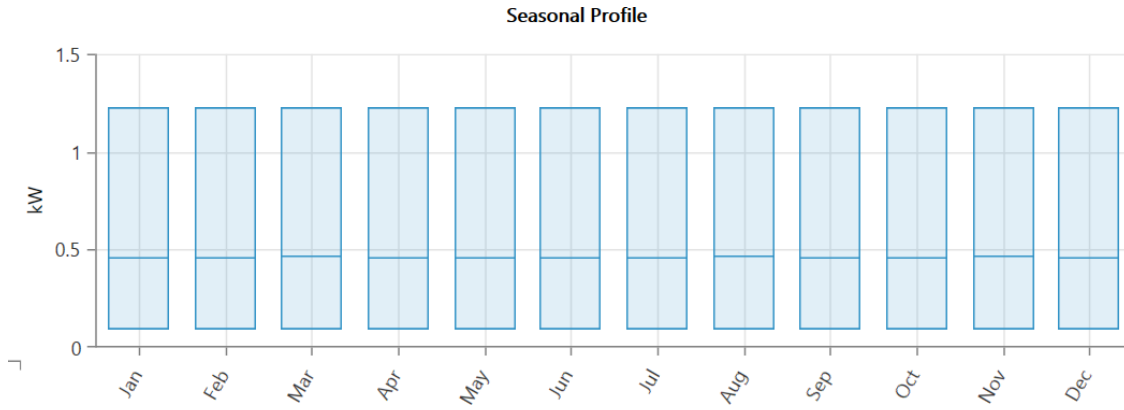
Şekil 5’da ise mevsimsel yük profili sunulmuştur. Mevsimlere göre şarj yüklerinde sınırlı değişimler gözlenmekle birlikte, günlük toplam enerji tüketimi genel olarak sabit kalmaktadır. Bu durum, elektrikli araç kullanımının mevsimden bağımsız olarak sürdüğünü göstermektedir.



Şekil 3. Günlük Yük Profili



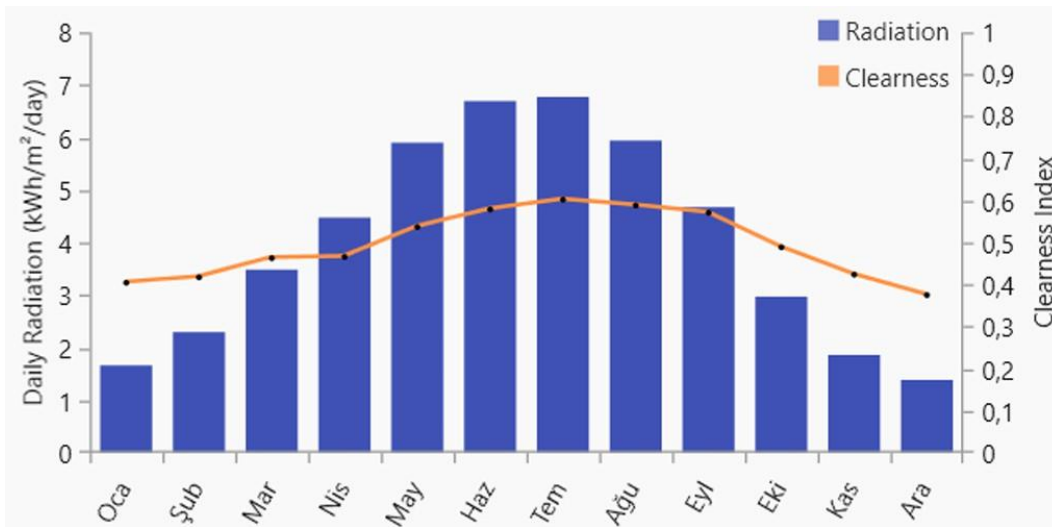
Şekil 4. Yıllık Yük Profili



Şekil 5. Mevsimlik Yük Profili

2.1. Analiz ve Yöntem

Bölgenin Meteorolojik Verileri Bölgenin solar enerji profili Şekil 7’de görülmektedir. HOMER Grid programı bu verileri NASA veri tabanından almaktadır. Bu veriler Yalova (40.5 enlem, 29.5 boylam) için alınmıştır.



Şekil 6. Aylık Ortalama GHI Verileri

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

Veri tabanından alınan meteorolojik veriler, 22 yılın ortalaması olup, 1983-2005 yılları arasında alınan verilerdir [4]. 1 yıl için günlük ortalama radyasyon değeri 4,02 kW/m²/gün olduğu görülmektedir. Ayrıca yaz aylarında yüksek ışınım şiddeti gözlemlenirken, kış aylarında yaz aylarına göre daha düşük ışınım şiddeti gözlenmektedir.

Hibrit Enerji Sisteminde Kullanılan Ekipmanlar

PV Panel

Bir PV panel, genellikle silikon gibi yarı iletken malzemelerden yapılmış olan fotovoltaik hücrelerden oluşan bir cihazdır. Bu paneller, güneş ışığını emer ve PV hücreler aracılığıyla DC enerjisine dönüştürür. Tek başına birimler olarak çalışabilirler veya güneş enerjisi sistemlerinin bileşenleri olarak bir araya getirilebilirler. Konut, ticari ve büyük ölçekli güneş enerjisi istasyonlarında elektrik üretimi için kullanılan güneş panelleri, düşük karbon ayak izleri nedeniyle sürdürülebilir ve çevre dostu bir enerji kaynağıdır. 0,55kW güneş panelli sistem için kurulum ve yenileme maliyetleri birim panel başına yaklaşık olarak 4500₺ olarak tahmin edilmekte, yıllık bakım gideri ise 50₺ ve tahmini ömrü 25 yıl olarak öngörülmektedir. PV panelinin güç çıkışı, Denklem (1) ile matematiksel olarak açıklanabilir:

$$P_{pv} = Y_{pv} \cdot f_{pv} \cdot \left(\frac{G_T}{G_{TSTC}} \right) \cdot [1 + \alpha_f (T_C - T_{CSTC})] \quad (1)$$

Belirtilen Denklem (1)'de, P_{pv} (W) terimi PV sistemin mevcut çıkış gücünü ifade eder. p_{pv} (W), PV sisteminin test koşulları (STC) altında standart çıkış gücü olarak tanımlanırken, f_{pv} (%), PV sistemine gerçek dünya koşullarını hesaba katmak için uygulanan ayarlama faktörüdür. G_T (W/m²), herhangi bir anda PV modülünü etkileyen güneş ışınımını temsil eder ve G_{TSTC} (1000 W/m²), PV sistemi üzerindeki güneş ışınımını STC altında, 25°C sıcaklıkta varsayılan ışınımı ifade eder. PV modülünün sıcaklık katsayısı, α_f (%/°C) olarak not edilir ve genellikle %0,3 ile %0,5 arasında değişir, bu da PV çıkışının sıcaklık değişimlerine olan hassasiyetini gösterir. T_C (°C), PV modülünün mevcut sıcaklığını, T_{CSTC} (°C) ise PV modülünün STC altındaki sıcaklığını belirtir ve bu da 25°C olarak ayarlanmıştır.

HOMER Grid yazılımı, PV sisteminin performansı üzerindeki sıcaklık katsayısının etkisini göz ardı ettiğinde, alternatif bir hesaplama yöntemi kullanır. denklem (2)

$$P_{PV} = Y_{PV} \cdot f_{PV} \left(\frac{G_T}{G_{tstc}} \right) \quad (2)$$

Akü

Akü, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren ve depolayan bir cihazdır. Çeşitli boyutlar ve kapasitelerde, farklı uygulamalar için mevcuttur. Taşınabilir elektronikler, araçlar ve enerji depolama sistemlerini güçlendirmede, şarj ve deşarj döngüleri sırasında kimyasal reaksiyonlardan yararlanarak kritik bir rol oynarlar. Şarj sırasında, elektrik enerjisi akü içindeki kimyasal reaksiyonları başlatarak enerjiyi kimyasal bir formda

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

depolar. Deşarj olurken, depolanan kimyasal enerji tekrar elektrik enerjisine dönüştürülerek çıkış sağlanır.

$$P_{out} = I \cdot V_{output} = V_0 I - R_0 I^2 \quad (3)$$

Bu formül, akülerin iç direncini ve nominal voltajını dikkate alarak çıkış gücü hesaplar ve enerji depolama sistemlerinin performansını değerlendirmek için önemlidir [7].

Yapılan senaryoda, akü yedekleme sistemi olarak kullanılır. Bu sistem ayrıca yük boyunca gerilim değerini sabit tutar. Sistem modellenirken lityum iyon pil için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Akü grubu seri/paralel konfigürasyonda sıralanmış akülerinden oluşur. Piyasada bir lityum iyon pillinin alım maliyeti 12,000₺, değiştirme maliyeti ise yine 12,000 ₺ değerinde olduğu saptanmıştır.

Dönüştürücü

DC'yi AC'ye çeviren bir cihazdır. Birçok elektronik alet ve sistem DC ile çalışmakta iken, evler, iş yerleri ve genel güç altyapıları genellikle AC kullanır. Bu bağlamda, dönüştürücüler DC'den AC'ye enerji dönüşümünde hayati bir role sahiptirler. Küçük ölçekli taşınabilir aletlerden başlayıp, geniş ölçekli güneş veya rüzgar enerjisi sistemlerine uzanan geniş bir uygulama yelpazesinde dönüştürücü teknolojilerinden yararlanılmaktadır. Dönüştürücü fonksiyonları ve kullanım alanlarına bağlı olarak çeşitli türleri ve özellikleri mevcuttur. İnverterlerin temel işlevi, DC girişini verimli bir şekilde AC çıkışa dönüştürmektir; bu da enerji verimliliği konusunda kritik bir öneme sahiptir. Bazı dönüştürücü modelleri ise voltaj ve frekans ayarları gibi ek fonksiyonlara imkan tanımaktadır. Sistemde kullanılan dönüştürücünün kurulum ve yenileme maliyeti 65.000₺ olarak belirlenmiş, yıllık bakım maliyeti 400₺ olarak hesaplanmış ve kullanım ömrü 10 yıl olarak öngörülmüştür. Dönüştürücü kapasitesi, Denklem aracılığıyla belirlenmiştir [8].

$$P_{inv} = \frac{E_{Lmax}}{n_{DC/AC}} \quad (4)$$

Simülasyon Aracı

Simülasyon aracı olarak kullanılan HOMER Grid yazılımı, hibrit enerji sisteminin bileşenlerinin seçimi ve boyutlandırılması için kullanılmıştır [6].

HOMER Grid yazılımının temel yeteneği, bir güç sisteminin uzun vadeli çalışmasını simüle etmektir. Simülasyon sürecinde; yazılım, sistemin optimizasyonu, hassasiyet analizi, belirli sistem parametreleriyle çeşitli sistemlerin kombinasyonunu ve işletme stratejisi gibi birçok kalemde bilgi vermektedir [8].

HOMER Grid yazılımı kullanıcı tarafından belirlenen hibrit sistemlerin tüm kombinasyonlarını simüle eder. Uygulanabilir olmayan tüm kombinasyonları elemekte ve mevcut maliyete göre uygulanabilir sistemleri sıralamaktadır. Ayrıca optimal bir sistem türünün tanımlamak için hassaslık değişkenlerine karşın bir dizi parametrelerin belirlenmesine izin verir. Homer Grid yazılımının önemli bir avantajı da elektrikli araç şarj istasyonunu yük olarak modele dahil edebilmesidir. Bununla birlikte geleceğe yönelik enerji ihtiyaçlarını daha gerçekçi bir şekilde analiz etme ve sistem için

sürdürülebilir çözümler üretmeye imkan sağlamaktadır.

Elektrikli Araç Şarj İstasyonu

Elektrikli araç şarj istasyonları, elektrikli araçların bataryalarının şarj edilmesini sağlayan ve sürdürülebilir ulaşım altyapısının temel bileşenlerinden biri olan sistemlerdir. Bu istasyonlar, elektrik enerjisini araca kontrollü bir şekilde aktararak bataryanın güvenli ve verimli biçimde doldurulmasını sağlar. Günümüzde ev tipi şarj çözümlerinin yanı sıra, halka açık şarj istasyonları da yaygın olarak kullanılmakta olup, özellikle şehir merkezleri, otoparklar, alışveriş merkezleri ve ana ulaşım aksları üzerinde konumlandırılmaktadır.

Şarj istasyonları temel olarak AC ve DC şarj sistemleri olmak üzere iki ana grupta incelenmektedir. AC şarj istasyonları genellikle daha düşük güç seviyelerinde çalışmakta ve ev ya da iş yerlerinde uzun süreli şarj için tercih edilmektedir. DC şarj istasyonları ise yüksek güç kapasiteleri sayesinde araçların çok daha kısa sürede şarj edilmesine imkân tanımakta ve özellikle hızlı şarj ihtiyacının olduğu durumlarda avantaj sağlamaktadır. Bu şarj altyapıları, farklı araç tipleriyle uyumluluğu sağlamak amacıyla çeşitli konektör tipleri ve şarj standartlarına göre tasarlanmaktadır.

Literatürde yapılan çalışmalarda, elektrikli araçların şarj ihtiyacının yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenmesinin, hem şebeke yükünü azalttığı hem de çevresel etkileri önemli ölçüde düşürdüğü belirtilmektedir.

Özellikle HOMER Pro yazılımı kullanılarak yapılan hibrit enerji sistemi analizlerinde, konut tipi yükler ile elektrikli araç şarj taleplerinin birlikte ele alınmasının enerji yönetimi açısından daha gerçekçi sonuçlar verdiği vurgulanmaktadır [3].

Tablo 1. Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Teknik Bilgileri

Araç Modeli	Elektrikli Araç Nüfusu Oranı (%)	Elektrikli Araç Başına Maksimum Şarj Gücü(kW)	Ortalama Şarj Süresi (sa)
Tesla	50	11	6
TOGG	50	11	6

Tablo 1. Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Teknik Bilgileri

Simülasyon Modeli

Bu çalışmada, Bursa ilinin Yıldırım ilçesinde yer alan bir konut için elektrikli araç şarjına yönelik hibrit enerji sistemi HOMER Grid yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Şekil 1, 2 ve 3'te gösterildiği üzere, yalnızca şebeke bağlantılı sistem, şebeke–PV destekli sistem ve şebeke–PV–akü içeren sistem olmak üzere üç farklı yapı, tek zamanlı ve çift zamanlı tarifeler altında incelenmiş ve toplam altı senaryo oluşturulmuştur.

Modelde elektrikli araç şarj yükü günlük 70 kWh, maksimum güç talebi ise 24 kW olarak tanımlanmıştır. Elektrikli araç şarjı, HOMER Grid ortamında “EV Charging Load” olarak modellenmiş ve sistemin ana yükü olarak ele alınmıştır. Şarj işleminin ağırlıklı olarak gece saatlerinde gerçekleştiği kabul edilmiştir.

Simülasyonlarda PV sistem kapasitesi 25 kW, akü depolama sistemi 40 adet 1 kWh kapasiteli akü ve dönüştürücü kapasitesi 15 kW olarak belirlenmiştir. HOMER Grid'in

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

optimizasyon özelliği kullanılarak, farklı senaryolar için teknik ve ekonomik açıdan en uygun sistem konfigürasyonları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Ekipman Türü	Başlangıç Maliyeti (\$)	Değiştirme Maliyeti (\$)	İşletme Maliyeti (\$/yıl)	Ömür (yıl)
PV (25 kW)	$25 \times 2500 = 62,500$	$25 \times 2500 = 62,500$	$25 \times 10 = 250$	25
Dönüştürücü (15 kW)	$15 \times 300 = 4,500$	$15 \times 300 = 4,500$	$15 \times 10 = 150$	15
Akü (40 adet, 1 kWh LA)	$40 \times 300 = 12,000$	$40 \times 300 = 12,000$	$40 \times 10 = 400$	10

Tablo 2. Ekipman Maliyet Değerleri

Simülasyonda Kullanılan Ekonomik Parametreler

Simülasyonun daha gerçekçi yapılabilmesi için ekonomik değerlerin hesaplanmasında bazı parametrelerin girilmesi gerekmektedir. Faiz oranı ve enflasyon oranı gibi proje ömründe maliyeti etkileyecek parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Faiz oranı bir ekonomik varlığın bugünkü değerinin hesaplanmasında kullanılan oranı iken, enflasyon oranı ise alım gücünü ifade etmektedir. Simülasyonda kullanılan faiz oranı %48,25 enflasyon oranı ise %44,38'dir [10].

Tarife Adı	Maliyet (\$/kWh)	Kullanım Zamanı (sa)
Tek Zamanlı	0.086	00:00 – 24:00
Gündüz	0.087	06:00 – 17:00
Puant	0.145	17:00 – 22:00
Gece	0.055	22:00 – 06:00
Şebekeye Satış	0.031	00:00 – 24:00

Tablo 3. Elektrik Tarifeleri ve Maliyet Tablosu

3. Sonuçlar ve Tartışma

Hibrit Sistemlerin Performans Analizi

Bu çalışmada EV Charging Load için kurulan sistemde farklı mimariler HOMER Pro ile karşılaştırılmıştır. Şebeke, PV ve akü seçenekleri için optimizasyon yapılmış; ekonomik göstergeler (NPC, LCOE, işletme maliyeti, CAPEX, yenilenebilir oranı vb.) üzerinden değerlendirme yapılmıştır.

Senaryo 1: Sadece Şebeke (Referans Sistem)

Bu senaryoda sistem tamamen şebekeden beslenmektedir. Yenilenebilir enerji kaynağı ve depolama olmadığı için ilk yatırım maliyeti düşük görünse de uzun vadede maliyetler tamamen elektrik fiyatlarına bağlı kalır. HOMER sonuçlarına göre bu senaryoda net bugünkü maliyet (NPC) 911,623 \$, birim enerji maliyeti (LCOE) 2.76 \$/kWh ve yıllık

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

işletme maliyeti 70,518 \$/yıl olarak hesaplanmıştır. Başlangıç yatırım maliyeti (CAPEX) 0 \$ olup yenilenebilir enerji oranı %0'dır. Genel olarak bu senaryo, şebekeye tam bağımlılık nedeniyle ekonomik açıdan zayıf bir seçenek olarak görülmektedir.

Senaryo 2: Şebeke + PV

Bu senaryoda sisteme 25 kW PV eklenmiştir. PV üretimi ile şebekeden alınan enerji azalmakta, böylece hem maliyet hem de şebeke bağımlılığı düşmektedir. HOMER sonuçlarına göre NPC 475,923 \$, LCOE 0.650 \$/kWh, yıllık işletme maliyeti 36,465 \$/yıl olarak bulunmuştur. CAPEX 4,525 \$ olup yenilenebilir oranı %76.8'dir. PV'nin yıllık enerji üretimi 54,171 kWh/yıl seviyesindedir. Proje ekonomisi açısından IRR %755 ve basit geri ödeme süresi 0.13 yıl olarak hesaplanmıştır.

Senaryo 3: Şebeke + PV + Akü

Bu senaryoda PV sistemine ek olarak 40 kWh akü ve 15 kW dönüştürücü sisteme dahil edilmiştir. Amaç, gündüz üretilen fazla enerjiyi depolayıp uygun saatlerde kullanarak şebekeden enerji alımını daha da azaltmaktır. HOMER sonuçlarına göre bu senaryoda NPC 278,810 \$, LCOE 0.427 \$/kWh ve yıllık işletme maliyeti 20,289 \$/yıl olarak elde edilmiştir. CAPEX 16,525 \$ olup yenilenebilir oranı %87.8'e yükselmiştir. PV'nin yıllık üretimi 54,171 kWh/yıl olarak hesaplanmıştır.

Senaryo 4: Üç Zamanlı Şebeke ve PV Panel

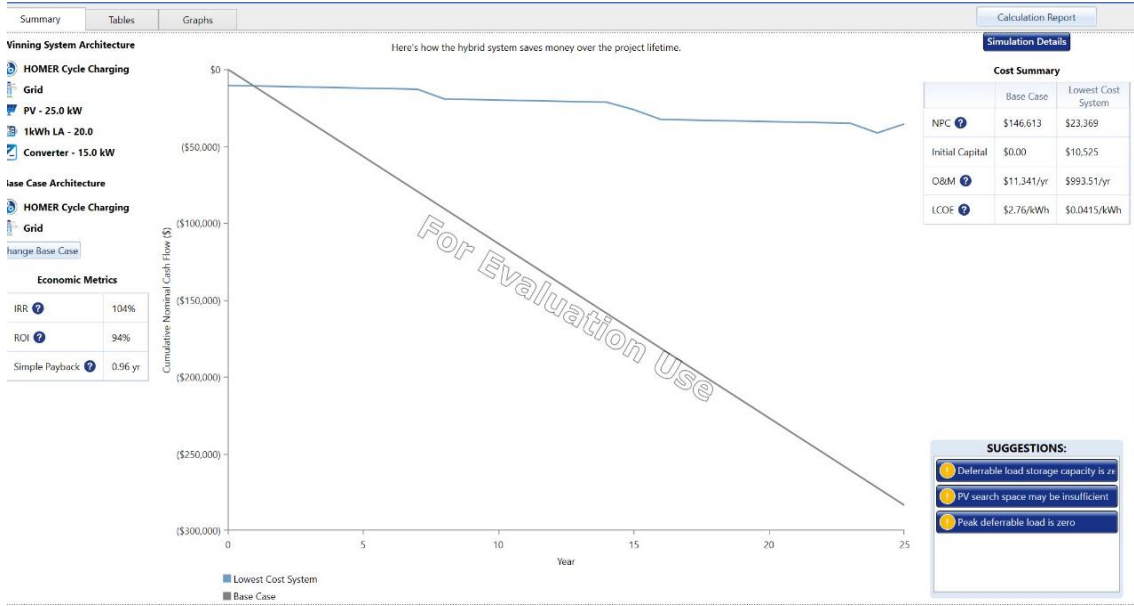
Bu senaryo, üç zamanlı şebeke tarifesi ile güneş enerjisinin birleştirildiği bir hibrit enerji sistemi olarak tasarlanılmıştır. Sistemin bölümleri 25 kW kapasiteli güneş panelleri ve enerji ihtiyacının önemli bir kısmını karşılayan üç zamanlı şebeke tarifesinden oluşmaktadır. Bu sistem, güneş enerjisi üretimi ve şebeke enerjisi kullanımı arasındaki dengenin optimize edilmesi üzerine kurulmuştur. Düşük maliyetli saatlerde şebekeden enerji alımı sağlanırken, güneş panellerinin enerji üretimi maksimum düzeyde kullanılmış ve fazla üretim yapılan enerji şebekeye satılmıştır.

Net Bugünkü Maliyet	₺534.864	Yıllık Tasarruf	₺35.387
Enerji Maliyeti	₺0,484/kWh	Geri Ödeme Süresi	7,8 yıl
Başlangıç Maliyeti	₺256.546	Yatırım Geri Dönüş Oranı	7,60%
Yıllık İşletme Maliyeti	₺9.662	25 Yılda Tasarruf Edilen Tutar	₺884.667

Tablo 4. Senaryo 4 için Ekonomik Değerler

Yatırım ve Geri Ödeme Süresi

Senaryo 5, başlangıç yatırımı ve geri ödeme süresi açısından oldukça avantajlıdır. ₺256.545'lik başlangıç maliyeti, yıllık ₺35.387 tasarrufla 7,8 yıl gibi bir sürede geri dönmektedir. Bu, sistemin uzun vadeli ekonomik sürdürülebilirlik açısından en verimli seçenek olduğunu göstermektedir. 25 yıllık bir ömür boyunca sağlanacak toplam tasarruf miktarı, yatırımı daha da kârlı hale getirmektedir.



Senaryo 5: Üç Zamanlı ve Solar ve Akü

Üç zamanlı şebeke tarifesi ile güneş panellerinin ve enerji depolama sistemlerinin entegre edildiği bir modeldir. Güneş enerjisinin üretildiği saatlerde fazla enerji depolanarak, güneş ışığının olmadığı zamanlarda veya enerji talebinin yoğun olduğu saatlerde kullanılmaktadır. Simülasyon sonuçlarına göre, bu sistemin NPC değeri ₺618.234 olarak hesaplanmıştır. LCOE ₺0,638/kWh seviyesindedir ve bu durum, depolama sistemlerinin yüksek maliyetini yansıtmaktadır. Yıllık işletme maliyeti ₺18.419 olarak belirlenmiş ve sistemin yıllık tasarruf miktarı ₺30.245 olarak hesaplanmıştır. CAPEX ise ₺335.685 ile diğer senaryolara kıyasla en yüksek seviyede olmuştur. Karbon emisyonları açısından değerlendirildiğinde, sistem yılda yaklaşık 6,5 ton karbon emisyonunu azaltmıştır. Ancak, akülerin yüksek maliyeti, bu sistemin ekonomik avantajlarını sınırlayan bir faktör olmuştur.

4. Sonuç

Bu çalışmada, Bursa ili Yıldırım ilçesinde bir konutta elektrikli araç şarj yükünü karşılamak için şebeke bağlantılı hibrit bir sistem HOMER Pro ile modellenmiş ve farklı mimariler karşılaştırılmıştır. Çalışmada özellikle şebeke + PV + dönüştürücü ve şebeke

+ PV + akü + dönüştürücü yapılarının ekonomik etkisi incelenmiştir.

Simülasyon sonuçları net bir şekilde şunu gösterdi: sadece şebekeye dayalı çözüm, en kolay kurulan seçenek olsa da enerji birim maliyeti ve toplam maliyet açısından hibrit çözümlerin gerisinde kalıyor. Şebeke ağırlıklı senaryoda LCOE yaklaşık 2.76 \$/kWh ve NPC yaklaşık 146,613 \$ seviyesinde çıkarken, PV eklenen yapılarda maliyetler ciddi şekilde düşmüştür.

En uygun çözüm olarak öne çıkan mimari 25 kW PV + 15 kW dönüştürücü + akü (1kWh LA) içeren sistemdir. Bu yapıda NPC 23,369 \$, LCOE 0.0415 \$/kWh ve yıllık işletme maliyeti ~993.51 \$/yıl olarak hesaplanmıştır. Ayrıca sistemin yenilenebilir oranı %100 seviyesine çıkmış ve geri ödeme süresi ~0.96 yıl görülmüştür. PV'nin olduğu ama akünün olmadığı çözümde de performans güçlüdür (yaklaşık LCOE 0.120 \$/kWh, NPC 70,393

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

\$, yenilenebilir oranı %96.1 ve geri ödeme ~0.71 yıl), ancak toplam sistem maliyeti ve işletme tarafında akülü çözüm daha avantajlı sonuç vermiştir.

Özetle; Bursa/Yıldırım koşullarında bu çalışma, PV'nin şebeke bağımlılığını ve enerji maliyetini çok ciddi düşürdüğünü, akü entegrasyonunun ise yenilenebilir payını artırıp sistemi daha "tamamlayıcı" hale getirdiğini gösterdi. Bu yüzden elektrikli araç şarjı gibi düzenli bir yük için PV destekli hibrit tasarım, hem ekonomik hem de sistem performansı açısından en mantıklı seçenek olarak değerlendirilmiştir.

Kaynaklar

- [1].Mittal, Vikram, and Rajesh Shah. "Energy management strategies for hybrid electric vehicles: A technology roadmap." *World Electric Vehicle Journal* 15.9 (2024): 424.
- [2].Singla, Priyanshu, et al. "Design and simulation of 4 kW solar power-based hybrid EV charging station." *Scientific Reports* 14.1 (2024): 7336.
- [3].Türkdoğan, 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.
- [4].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.
- [5].Atik, İpek, and Ayşenur Sekin. "Hibrit yenilenebilir enerji sistem tasarımı: Balıkesir örneği." *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi* 13.3 (2022): 517-529.
- [6].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.
- [7].Güven, Aykut Fatih, and Nuran Yörükeren. "Bir Hibrit Enerji Sisteminin Parçacık Sürüsü Optimizasyon Algoritması-Genetik Algoritma ve Gri Kurt Optimizasyon Algoritma Tekniği ile Enerji Yönetimi ve Optimizasyonu: Yalova Üniversitesi için bir vaka çalışması." *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi* 12.2 (2022): 853-879.
- [8].Özbay, Harun, et al. "Geleceğin ulaşım tercihi: Elektrikli araçlar." *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi* 3.1 (2020): 34-50.
- [9].Kurumu, Enerji Piyasası Düzenleme. "Elektrik faturalarına esas tarife tabloları." *Online*. Url: <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrikfaturalarina-esas-tarife-tabloları>. [Access: September 2023] (2021).
- [10].Kuzu, Mehmet, and Fatih Kocaoğlu. "Seçmen Davranışlarına Ekonomik ve Finansal Kriz Kaynaklı Enflasyonist Şokların Etkisinin Ekonomik Oylama Teorisi Çerçevesinde İncelenmesi: 2018-2022 Türkiye Örneği." *Politik Ekonomik Kuram* 7.2 (2023): 252-295