

Değişik ölçekteki elektrik araç sayısı ve yenilenebilir enerji kapasitesi senaryoları dikkate alınarak bir konut bölgesinin farklı amaç fonksiyonları doğrultusunda işletildiği bir enerji yönetimi yaklaşımı

An energy management approach in which a residential neighbourhood is operated for different purpose functions, taking into account different scenarios for the number of electric vehicles and renewable energy capacity at different scales

Aslı ZAIMOĞLU¹ , Edanur İŞCAN¹ , Burak ŞAFAK¹ , Alper ÇİÇEK^{*1} 

¹Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 22030, Edirne

• Geliş tarihi / Received: 01.01.2025

• Kabul tarihi / Accepted: 04.07.2025

Öz

Önümüzdeki yıllarda elektrik talebinin sürekli artması beklenmektedir. Bu yükseliş, fosil yakıtlara olan büyük bağımlılık nedeniyle, enerji sistemlerinin karbondan arındırılmasının önünde ciddi bir engel teşkil etmektedir. Ayrıca, dünya genelinde toplam elektrik tüketiminin ve karbon emisyonlarının önemli bir yüzdesi konutlar tarafından karşılanmaktadır. Bu durum göz önüne alındığında, konutlarda hem yenilenebilir enerji kullanımını artırmak hem de etkin enerji yönetimi gerçekleştirmek, sürdürülebilirlik adına iyi bir çözüm sunmaktadır. Özellikle bir konut bölgesindeki farklı sayıdaki elektrikli araçların varlığı ve çeşitli kapasitelerdeki yenilenebilir enerji kaynakları da enerji yönetimi stratejilerinde muhakkak dikkate alınmalıdır. Bu çalışma, farklı sayıdaki elektrikli araçları ve farklı kapasitelerdeki yenilenebilir enerji kaynaklarını göz önünde bulundurarak bir konut bölgesi için optimum bir enerji yönetim modeli oluşturmayı hedeflemektedir. Modelin, konut bölgesinin ekonomik işletimini sağlaması, güneş enerjisi kullanımını maksimize etmesi ve yük faktörünü en üst düzeye çıkarması gibi amaçlar doğrultusunda çalıştırılabildiği ifade edilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen güç hem doğrudan konut bölgesinde değerlendirilebilirken hem de fazla üretim durumunda elektrik şebekesine satılabilmektedir. Benzer şekilde, elektrikli araç bataryalarının deşarj edilmesiyle sağlanan güç de elektrik şebekesine satılabilir veya konut bölgesinde kullanılabilir. Bu enerji yönetim stratejisi, karışık tamsayılı doğrusal programlama yöntemiyle modellenmiştir. Çalışma kapsamında, farklı elektrikli araç sayıları ve çeşitli yenilenebilir enerji kapasiteleri dikkate alınarak detaylı durum analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Test çalışmaları için, Edirne ilinde bulunan bir konut bölgesinin gerçek yük verileri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen modelin kâr ve yük faktörü maksimizasyonu hedefleri doğrultusunda istenen performansı başarılı bir şekilde sağladığını göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Elektrikli araçlar, Ekonomik işletim, Konut bölgesi, Yenilenebilir enerji, Yük faktörü maksimizasyonu

Abstract

In the coming years, electricity demand is expected to continuously increase. This rise poses a significant obstacle to the decarbonization of energy systems due to the heavy reliance on fossil fuels. Furthermore, residences account for a considerable percentage of global electricity consumption and carbon emissions. Given this, enhancing renewable energy utilization and implementing effective energy management in residential areas offer a promising solution for sustainability. Specifically, the varying numbers of electric vehicles (EVs) and diverse capacities of renewable energy sources (RES) within a residential area must also be meticulously considered in energy management strategies. This study aims to develop an optimal energy management model for a residential area, taking into account different numbers of electric vehicles and various capacities of renewable energy sources. The model is designed to ensure the economic operation of the residential area, maximize solar energy utilization, and optimize the load factor. Power generated from renewable energy sources can be directly utilized within the residential area, or, in instances of surplus production, sold to the electricity grid. Similarly, power supplied by discharging electric vehicle batteries can also be sold to the electricity grid or used within the residential area. This optimization strategy is modeled using a mixed-integer linear programming (MILP) approach. Within the scope of this study, detailed case analyses were conducted considering different numbers of electric vehicles and various renewable energy capacities, and the obtained results were compared. For test cases, real load data from a residential area in Edirne, Türkiye, were utilized. The results demonstrate that the developed model successfully achieves the desired performance in terms of profit and load factor maximization objectives.

Keywords: Electric vehicles, Economical operation, Residential area, Renewable energy, Maximization of load factor

*Alper ÇİÇEK; alpercicek@trakya.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

1.1. Motivasyon

1.1. Motivation

Dünyada ve ülkemizde hızla artan nüfus ve teknolojik gelişmelerle birlikte elektrik talebi de sürekli olarak artış göstermektedir. Elektrik enerjisi üretiminde fosil yakıtlara olan bağımlılık, enerji sistemlerinin karbon emisyonlarını azaltarak yenilenebilir enerji sistemlerine geçişini zorlaştırmaktadır. Bu durum, enerji üretim ve tüketim süreçlerinde sürdürülebilir çözümler geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Enerji dönüşümünün başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi hem çevresel hem de ekonomik açıdan büyük faydalar sağlayabilir.

Özellikle konut sektöründe, enerji tüketiminin azaltılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması, sürdürülebilir bir enerji geleceği açısından kritik öneme sahiptir. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) verilerine göre, küresel sera gazı emisyonları içinde binalar sektörünün (konutları da kapsayan) doğrudan ve dolaylı enerji tüketimi ile inşaat süreçleri dahil olmak üzere %21'lik bir paya sahip olması, bu sektörün iklim değişikliğiyle mücadelede azımsanmayacak ve kritik öneme sahip bir konumda olduğunu açıkça göstermektedir. Fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak, bu sektördeki karbon ayak izini küçültmek için enerji yönetimi çözümleri gereklidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, enerji talebinin karşılanmasında önemli bir rol oynarken, enerji depolama ve yönetim sistemleri ile birlikte ele alındığında daha etkin sonuçlar elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada, elektrikli araçlar ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ile konut bölgelerinde uygulanabilecek çok amaçlı bir enerji yönetimi modeli geliştirilmesi hedeflenmiştir. Model, farklı yenilenebilir enerji kapasiteleri, elektrikli araç sayıları ve değişken elektrik fiyatları gibi faktörleri göz önüne alarak ekonomik, çevresel ve operasyonel hedeflere ulaşmayı amaçlamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen güç, karbon emisyonlarının azaltılmasında etkili bir araç olarak değerlendirilirken, elektrikli araç bataryalarının depolama ve enerji dengeleme potansiyeli de dikkate alınmıştır.

Konut bölgelerinde enerji yönetimini sağlamak adına geliştirilen bu model, enerji talebini optimize ederek yenilenebilir enerji kullanımını artırmayı, karbon emisyonlarını azaltmayı ve ekonomik işletim olanaklarını genişletmeyi amaçlamaktadır. Çalışmada farklı senaryolarla test edilen modelin sonuçları, sürdürülebilir bir enerji yönetimi yaklaşımı için uygulanabilir bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Bu kapsamda, konut bölgeleri için yeni nesil enerji yönetimi sistemlerinin geliştirilmesi, enerji dönüşümünde önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

1.2. Literatür taraması

1.2. Literature review

Fosil yakıtların sebep olduğu çevre kirliliği ve bu kaynakların tükenecek olmaları durumu göz önüne alındığında yapılacak toplu konut projelerinde en iyi seçeneğin yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek olduğu görülmektedir. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynakları elektrikli araçların şarj edilmesi konusunda da fayda sağlayabilmektedir. Literatürde yenilenebilir enerji kaynakları ve elektrikli araçlara sahip konut bölgeleri ile ilgili çeşitli çalışmalar mevcuttur.

Tostado-Véliz ve diğerleri elektrikli araç ve yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip bir evin çok amaçlı ev enerji yönetim modelini sunmuşlardır. (Tostado-Véliz vd., 2023). Ma ve Poursoleiman bir evin elektrik faturasının minimizasyonu için bir model sunmuşlardır. Evde kontrol edilebilir cihazlar, elektrikli araç ve rüzgâr türbini olduğu düşünülmektedir. Ayrıca evin şebekeden bağımsız çalışabildiği de ifade edilmektedir (Ma & Poursoleiman, 2022). Li ve SaeidNahaei elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji kaynakları, birleşik ısı ve güç sistemi ve yüklerin yer aldığı bir enerji bölgesinin optimum enerji yönetimi için bir yapı sunmuşlardır (Li & SaeidNahaei, 2022). Rehman ve diğerleri elektrikli araç, yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama sistemine sahip akıllı evlerin optimum güç yönetimi için karışık tamsayılı doğrusal programlama modeline dayalı bir yapı sunmuşlardır (Rehman vd., 2022). Yan ve diğerleri elektrikli araçlar ve esnek yüklerle sahip bir evin optimum enerji yönetimi için balina algoritmasına dayalı bir model ileri sürmüşlerdir (Yan vd., 2023). Wu ve diğerleri elektrikli araçlar, PV sistem ve batarya enerji depolama sistemi sahip şebeke ile

etkileşimli evler için enerji tüketim maliyetinin en aza indirilmesi için bir model sunmuşlardır (Wu vd., 2022). Huang ve diğerleri esnek yüklere sahip olan kırsal bölgelerde yer alan evlerin enerji yönetimi için bir enerji yönetim modeli sunmuşlardır (Huang vd., 2023). Zhu ve diğerleri talep cevabı programını da dikkate alarak hidrojen enerji depolama sistemi ve yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip bir mikroşebekenin çok amaçlı işletim problemini açıklamışlardır (Zhu vd., 2023). Lotfi ve diğerleri elektrikli araçlara sahip akıllı şehirlerde enerji yönetimi ile ilgili bir yapı önermişlerdir (Lotfi vd., 2022). Song ve diğerleri PV sistem ve batarya enerji depolama sistemine sahip evler için bir ev enerji yönetim sistemi modeli önermişlerdir (Song vd., 2022).

1.3. Literatüre katkılar

1.3. Contributions

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde enerji yönetimi ya bireysel bir ev için gerçekleştirilmiştir ya da farklı sayıdaki elektrikli araç ve farklı kapasitedeki yenilenebilir enerji varlığı durumu dikkate alınmamıştır. Ayrıca literatürde bu durum ile birlikte bir konut bölgesinin farklı amaç fonksiyonları için işletimi konusunun dikkate alınmadığının da altı çizilmelidir.

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarına ve elektrikli araçlara sahip bir konut bölgesinin optimum enerji yönetimi konusu ele alınmaktadır. Çalışmada amaç fonksiyonu olarak farklı amaçlar belirlenmiştir ve konut bölgesinin bu amaçlar doğrultusunda işletilebildiği ifade edilmelidir. Konut bölgesinde ekonomik işletim minimizasyonu, güneş enerjisi kullanımı ve yük faktörü maksimizasyonu sağlanabilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarında üretilen güç konut bölgesinde değerlendirilebilmekte ya da elektrik şebekesine satılabilmektedir. Elektrikli araçların deşarj gücünün elektrik şebekesine satılabildiği ya da konut bölgesinde kullanılabildiği de ifade edilmelidir. Önerilen enerji yönetim stratejisinin etkinliğinin kanıtlanması için farklı sayılardaki elektrikli araç ve yenilenebilir enerji kapasiteleri dikkate alınarak çeşitli durum çalışmaları yürütülecektir. Ayrıca konut bölgesi verileri için Edirne il merkezinde yer alan bir konut bölgesinin gerçek transformatör verilerinin kullanılacağı ifade edilmelidir. İlgili verilerin dağıtım işletmecisinden elde edildiğinin de altı çizilmelidir.

Bu çalışmanın farklı sayılardaki elektrikli araç varlığı ve farklı kapasitelerdeki yenilenebilir enerji varlığını dikkate alarak bir konut bölgesinin farklı amaç fonksiyonları doğrultusunda enerji yönetiminin gerçekleştirildiği literatürdeki ilk model olduğu ifade edilmelidir.

Konutlarda ve elektrikli araçlarda yenilenebilir enerjinin kullanımı ile şebekede yaşanabilecek olumsuzluklardan kaynaklı elektrik kesintilerinin de önüne geçilerek konutların ve araç şarj istasyonlarının enerjisiz kalmasının da engellenmesi amaçlanmaktadır.

Önerilen enerji yönetimi modeli konut bölgelerinde enerji yönetim süreçlerin uygulanmasında konusunda yardımcı olabilir. Ayrıca hareket planlarının oluşturulmasını sağlayabilir, enerji tüketimini azaltmak için hedef belirlemeyi ve enerji performans göstergelerini oluşturmayı sağlayabilir. Bunların dışında enerji performansını iyileştirmek için iyileştirme fırsatlarını belirlemeyi, önceliklendirmeyi de sağlayabilir.

Sunulan model ile bir konut bölgesinin farklı elektrikli araç varlıkları ve yenilenebilir enerji senaryolarını düşündüğü için ekonomik ve çevreci bir işletimin gerçekleştirilmesini sağlayacaktır. Ayrıca elektrik şebekesi işletmecisinin açısından da yönetilebileceği ifade edilmelidir ki bu çalışmada yük faktörü maksimizasyonu sağlanabilmektedir. Böylelikle hem konut bölgesi hem de şebeke için bir kazanç elde edilebilmektedir.

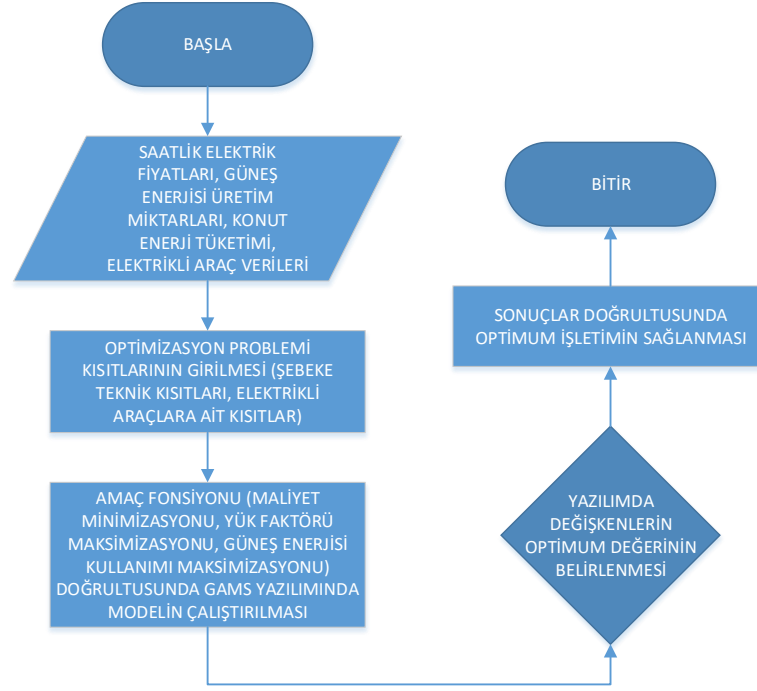
Sunulan enerji yönetim stratejisi elektrikli araçların konut bölgesine ve elektrik güç sistemine entegrasyonunu kolaylaştırabilir ve ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarının konut bölgesine dahil edilmesi ile ilgili problemlerin çözümü için iyi bir referans sağlayabilir. Ayrıca elektrikli araçlar ve yenilenebilir enerji kaynaklarını içeren bir konut bölgesi sürdürülebilir şehirlerin sağlanmasına yardımcı olabilir. Fosil kaynakların kullanımını azaltabilir enerjide güvenilirliğin artırılmasını sağlayabilir.

2. Materyal ve metot

2. Material and method

Bu çalışmada değişik ölçekteki yenilenebilir enerji kapasitesi ve farklı sayılardaki elektrikli araç varlıkları dikkate alınarak bir konut bölgesinin enerji yönetiminin gerçekleştirilmesi açısından karışık tamsayılı doğrusal

programlama modeli sunulmaktadır. Konut bölgesinin ekonomik açıdan en uygun işletilmesi, güneş enerjisi kullanımının maksimizasyonu ve yük faktörünün maksimizasyonu olmak üzere üç farklı işletim durumu dikkate alınmaktadır. Sunulan enerji yönetim stratejisi elektrikli araçları ve yenilenebilir enerji kaynaklarını barındırdığı için şebekeye bir esneklik sağlayabilmektedir. Ayrıca konut bölgesinden şebekeye de enerji satışı gerçekleştirilebilmektedir. Önerilen enerji yönetim stratejisinin etkinliğinin kanıtlanması için dinamik elektrik fiyatları altında farklı sayılardaki elektrikli araçlar ve yenilenebilir enerji kapasitesi varlığı altında çeşitli durum çalışmaları gerçekleştirilecektir. Test çalışmaları GAMS v.24.1.3 yazılımı ve CPLEX v.12 çözücüsü aracılığı ile yürütülecektir. Önerilen enerji yönetim stratejisine ait akış diyagramı Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. Önerilen enerji yönetim stratejisine ait akış diyagramı
Figure 1. Flowchart of the Proposed Energy Management Strategy

2.1. Matematiksel formülasyon

2.1. Mathematical formulation

2.1.1. Amaç Fonksiyonu

2.1.1. Objective function

Çalışmada amaç fonksiyonu (1) denklemi ile verilmiştir. Amaç fonksiyonu A, B ve C bölümlerinden oluşmaktadır. A’da amaç toplam işletme maliyetini en aza indirmek, B’de güneş enerji sisteminden elektrik şebekesine satılan gücü en aza indirmek, C’de ise yük faktörünü maksimize etmektir. Konut bölgesi farklı amaç fonksiyonları doğrultusunda işletilebilmektedir. Yük faktörü ortalama gücün maksimum güce bölünmesi ile elde edilmektedir. Yük faktörünün tersi ise maksimum güçten ortalama gücün çıkartılması ile elde edilmektedir. Burada amaç fonksiyonu minimizasyonu içerdiği için yük faktörü ters olacak şekilde alınmıştır. Yük faktörünün maksimizasyonu ile YF_{ters} ’nin minimizasyonunun aynı anlama geldiği belirtilmelidir.

$$\text{Minimum } [A[\sum_t (P_t^{sebeke} \cdot \Delta_t \cdot \lambda_t^{alış}) - \sum_t ((P_t^{YEK-seb} + P_t^{ea-seb}) \cdot \Delta_t \cdot \lambda_t^{satış})] + B \sum_t (P_t^{YEK-seb}) + C[YF_{ters}]] \quad (1)$$

2.1.2. Güç dengesi

2.1.2. Power balance

Konut bölgesinin güç dengesi denklem (2) ile sunulmaktadır. Toplam talep, konut bölgesi evsel yükleri ve elektrikli araç yükünden oluşmaktadır. İlgili güç talebi ise elektrik şebekesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmaktadır.

$$\sum_k P_{t,k}^{güçtüketimi-evler} + P_t^{güçtüketimi-ea} = P_t^{şebeke} + P_t^{YEK-konut} + P_t^{ea-konut} \quad (2)$$

2.1.3. Yenilenebilir enerji kaynakları

2.1.3. Renewable energy sources

Konut bölgesinde her bir t anındaki toplam yenilenebilir enerji üretimi güneş enerjisi kaynağında üretilen güce eşittir. İlgili ifade (3)'te sunulmaktadır. Ayrıca (4)'te yenilenebilir enerji kaynaklarında üretilen gücün konutlarda kullanılabileceği ya da elektrik şebekesine satılabileceği ifade edilmektedir.

$$P_t^{YEK} = P_t^{GES} \quad (3)$$

$$P_t^{YEK} = P_t^{YEK-konut} + P_t^{YEK-şeb} \quad (4)$$

2.1.4. Elektrikli araçlar

2.1.4. Electric vehicles

Elektrikli araçların şarj durumları (5) denkleminde ifade edilmektedir. Burada ($t-1$) anındaki enerji durumunun üzerine t anındaki şarj ünitesinden sağlanan enerji eklenmektedir ya da deşarj edilen enerji çıkartılmaktadır. Elektrikli araçların zaman periyodunun başlangıcındaki ve sonundaki enerji düzeyleri sırasıyla (6) ve (7)'de tanımlanmaktadır. (8) ve (9)'da ise elektrikli araç bataryalarının sırasıyla maksimum ve minimum enerji düzeyleri tanımlanmaktadır. Maksimum şarj gücü limiti (10)'da ifade edilirken, (11) denklemi t periyodundaki toplam elektrikli araç şarj gücünün toplamını hesaplamaktadır. (12) denklemi ise deşarj gücü toplamlarını ifade etmektedir ki bu güç ya şebekeye satılabilmekte ya da konut bölgesinde değerlendirilebilmektedir. Elektrikli araçların aynı anda şarj ve deşarj olmaması durumu ise (13) ve (14) denklemleri ile sağlanmaktadır.

$$ED_{e,t} = ED_{e,t-1} + P_{e,t}^{şarj} \cdot \eta^{şarj} \cdot \Delta T - (P_{e,t}^{deşarj} / \eta^{deşarj}) \cdot \Delta T, \forall e, t > 1 \quad (5)$$

$$ED_{e,t} = ED_e^{başlangıç}, \forall e, t = T^{EAvarış} \quad (6)$$

$$ED_{e,t} = ED_e^{son}, \forall e, t = T^{EAayrılış} \quad (7)$$

$$ED_{e,t} \leq ED_e^{maksimum}, \forall e, t \quad (8)$$

$$ED_{e,t} \geq ED_e^{minimum}, \forall e, t \quad (9)$$

$$P_{e,t}^{şarj} \leq P_{e,t}^{şarj,maks}, P_{e,t}^{deşarj,maks}, \forall e, t \quad (10)$$

$$P_t^{güçtüketimi-ea} = \sum_e P_{e,t}^{şarj}, \forall e, t \quad (11)$$

$$P_t^{ea-şeb} + P_t^{ea-konut} = \sum_e P_{e,t}^{deşarj} \quad (12)$$

$$P_{e,t}^{şarj} \leq N \cdot u_{e,t} \quad (13)$$

$$P_{e,t}^{deşarj} \leq N \cdot (1 - u_{e,t}) \quad (14)$$

3. Bulgular

3. Results

3.1. Giriş verileri

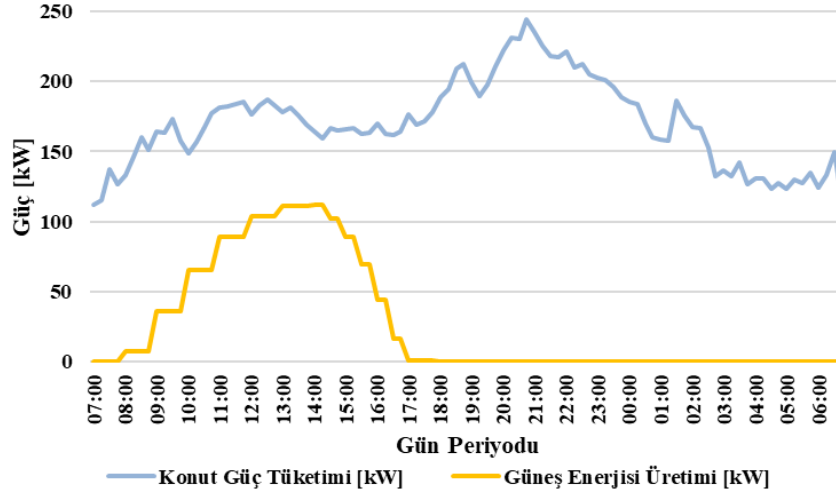
3.1 Input data

Çalışmada yenilenebilir enerji kaynakları ve elektrikli araç sayısı göz önünde bulundurularak, farklı amaç fonksiyonlarına göre çeşitli enerji yönetim modelleri oluşturulmuştur. Çalışmada 4 farklı elektrikli araç modeli ele alınmıştır. Bu araçların bataryalarına ilişkin veriler Tablo 1'de sunulmaktadır.

Güneş enerjisi üretimi için Edirne iline ait gerçek güneş enerjisi üretim verileri (Renewables.ninja weather and energy data) kullanılmıştır. Ayrıca konut bölgesinin güç tüketimi için Edirne ili dağıtım sistem operatöründen elde edilen gerçek yük verilerinin kullanıldığı belirtilmelidir. İlgili güneş enerjisi üretimi ve konut güç tüketimi verileri Şekil 2'de sunulmuştur.

Tablo 1. Elektrikli araçlar bataryalarının teknik özellikleri
Table 1. Technical characteristics of electric vehicle batteries

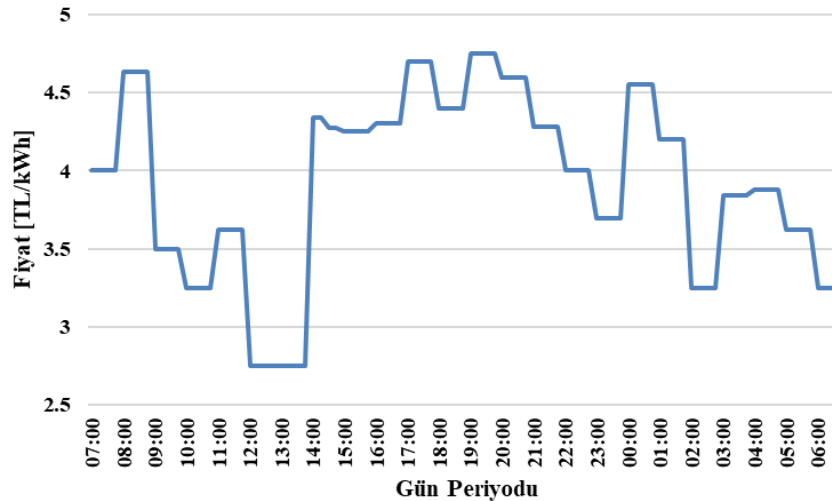
Elektrikli Araçlar	Minimum Batarya Kapasitesi (kWh)	Maksimum Batarya Kapasitesi (kWh)	Şarj Verimliliği
BMW i3	8.44	42.2	95%
Audi e-tron	19	95	95%
Kia Soul EV	5.4	27	95%
Nissan Leaf Plus	12.8	64	95%
TOGG	17.7	88.5	95%



Şekil 2. Konut güç tüketimi ve güneş enerjisi üretimi verisi

Figure 2. Residential power consumption and solar energy production data

Konut bölgesinin elektrik tedariki için elektrik piyasasından enerji satın alındığı varsayılmaktadır. Burada Türkiye Elektrik Piyasasına ait gerçek veriler kullanılmıştır. İlgili veri EPİAŞ'ın (EPİAŞ ŞEFFAFLIK PLATFORMU) web sayfasından elde edilmiştir ve Şekil 3'te sunulmuştur. Yük tüketimi, güneş enerjisi üretim miktarı ve elektrik birim fiyatları için kullanılan veriler 08/09/2022 tarihine aittir.



Şekil 3. Elektrik piyasası fiyat verisi

Figure 3. Electricity market price data

Çalışmada önerilen enerji yönetim stratejisini test etmek amacıyla maliyet minimizasyonu, yük faktörü maksimizasyonu ve güneş enerjisi kullanımı maksimizasyonu dikkate alınarak, ayrıca elektrikli araç sayısı ve farklı boyuttaki güneş enerjisi kapasiteleri düşünülerek 18 farklı durum çalışması gerçekleştirilmiştir. Durum

çalışmalarına ait detaylar Tablo 2’de sunulmaktadır. Buradaki durum çalışmalarında elektrikli araç sayısının 30 ve 10 olduğu durum ile güneş enerjisi sistem gücünün 150 kW, 75 kW ve 0 olduğu durumlar dikkate alınmaktadır.

Tablo 2. Gerçekleştirilen durum çalışmalarına ait detaylar

Table 2. Details of the conducted case studies

Durumlar	Amaç fonksiyonu	Elektrikli araç sayısı	Güneş enerjisi panel gücü
Durum 1	Maliyet minimizasyonu	30	150 kW
Durum 2	Maliyet minimizasyonu	30	75 kW
Durum 3	Maliyet minimizasyonu	30	0
Durum 4	Maliyet minimizasyonu	10	150 kW
Durum 5	Maliyet minimizasyonu	10	75 kW
Durum 6	Maliyet minimizasyonu	10	0
Durum 7	Yük faktörü maksimizasyonu	30	150 kW
Durum 8	Yük faktörü maksimizasyonu	30	75 kW
Durum 9	Yük faktörü maksimizasyonu	30	0
Durum 10	Yük faktörü maksimizasyonu	10	150 kW
Durum 11	Yük faktörü maksimizasyonu	10	75 kW
Durum 12	Yük faktörü maksimizasyonu	10	0
Durum 13	Güneş enerjisi kullanımı maksimizasyonu	30	150 kW
Durum 14	Güneş enerjisi kullanımı maksimizasyonu	30	75 kW
Durum 15	Güneş enerjisi kullanımı maksimizasyonu	30	0
Durum 16	Güneş enerjisi kullanımı maksimizasyonu	10	150 kW
Durum 17	Güneş enerjisi kullanımı maksimizasyonu	10	75 kW
Durum 18	Güneş enerjisi kullanımı maksimizasyonu	10	0

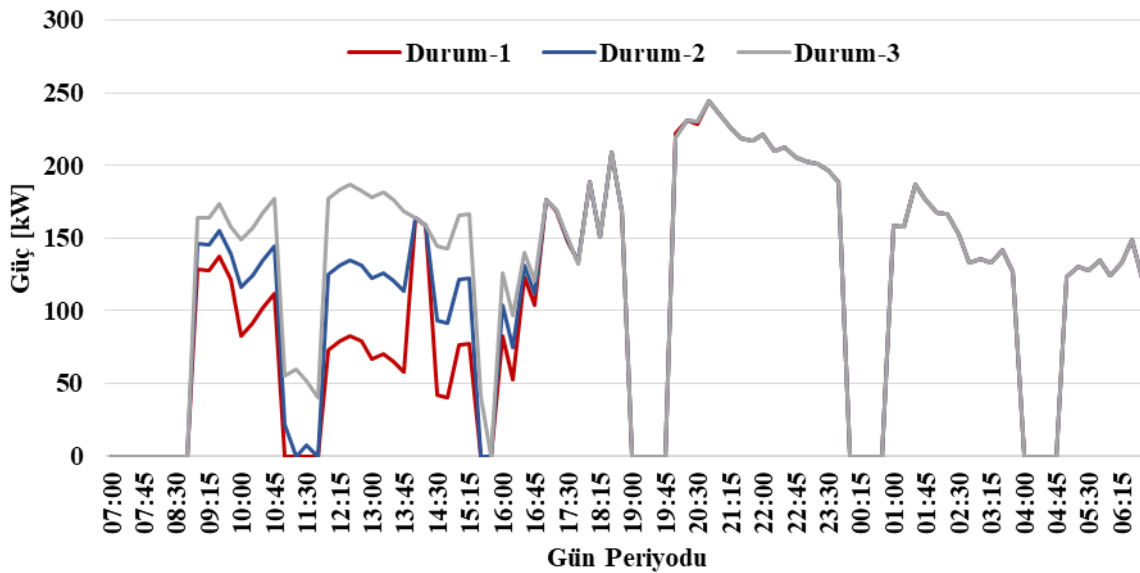
3.2. Test sonuçları

3.2 Test results

Durum çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre her bir durum için toplam maliyet, yük faktörü değeri ve karbon salınımı miktarı Tablo 3’te sunulmuştur. Burada amacın maliyet minimizasyonu olduğu durumlarda için güneş enerjisi kapasitesinin 150 kW olduğu durumda maliyetin en az gerçekleştiği belirtilmelidir. Güneş enerjisi kapasitesinin azalması ile maliyet giderek artmaktadır. Güneş enerjisinin olmadığı durumda günlük maliyet yaklaşık olarak 507 TL artmaktadır. Burada ilginç bir başka sonuç da elektrikli araç sayısının 30 olduğu durumda maliyetin daha az gerçekleşmesidir. Çünkü elektrikli araçlar konut bölgesinin beslenmesinde kullanılmaktadır ve bu durum şebekeden satın alınan enerjinin maliyetinin azaltılmasına sebep olmaktadır. Durum 1 ile Durum 4, Durum 2 ile Durum 5, Durum 3 ile Durum 6 karşılaştırıldığında elektrikli araç sayısının azalmasının yük faktörünü iyileştirdiği sonucuna ulaşılmaktadır. Çünkü elektrikli araçların şarj edilmesi durumunda şebekedeki yüklenme durumu yük faktörünün azalmasına sebep olmaktadır. Yük faktörünün maksimizasyonu hedeflenen Durum 7 – Durum 12’de yük faktörünün diğer durumlara kıyasla önemli ölçüde arttığı ve çoğunlukla 0,9’un üzerinde olduğu görülmektedir. Ayrıca burada güneş enerjisi kapasitesinin artması ile yük faktörünün bir miktar azaldığı sonucuna ulaşılmaktadır. Çünkü güneş enerjisi kapasitesinin artması ile şebekeden çekilen güç azalmıştır ve ortalama gücün düşmesi ile yük faktöründe bir miktar düşüş yaşanmıştır. Elektrikli araç sayısının artması ise yük faktörünün üzerinde olumlu bir etki yaratmaktadır çünkü elektrikli araçlar esneklik sağladığı için şarj ve deşarj durumları ile yük faktörünün artmasına olumlu etki yaratmaktadır. Güneş enerji kullanımının maksimize edilmek istendiği Durum 13 – Durum 18’de ise hem yük faktörünün daha düşük hem de maliyetin daha yüksek olduğu sonucuna varılmaktadır. Bu durumda güneş enerji sisteminde üretilen güç ya elektrikli araçlarda kullanılmakta ya da konut bölgesinde değerlendirilmektedir. Yani elektrik şebekesine satış olmadan güneş enerjisinden bölgede maksimum faydalanılmaktadır.

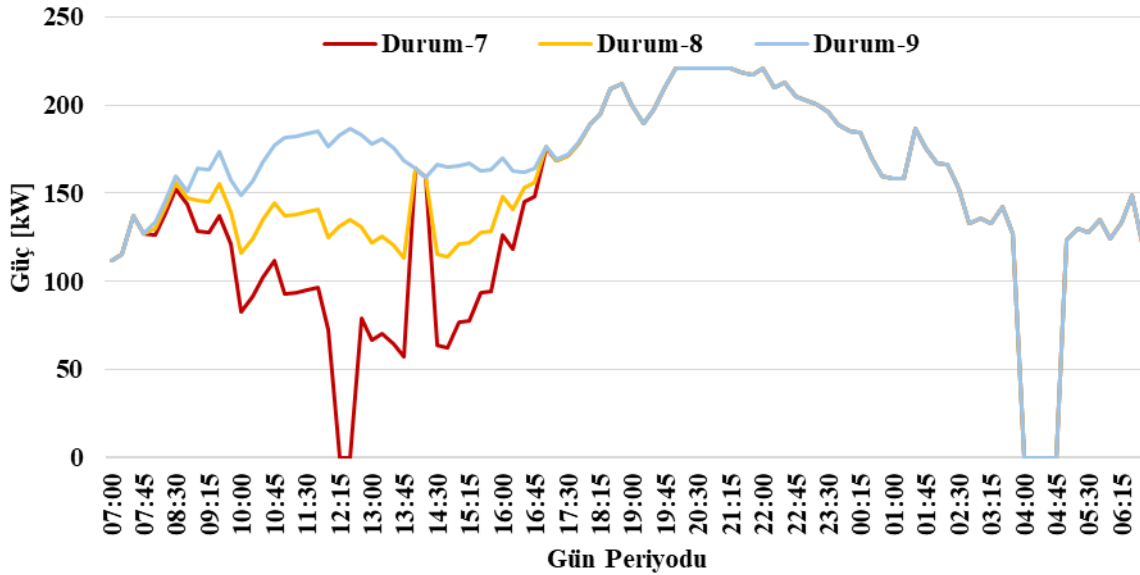
Tablo 3. Test çalışmalarından elde edilen sonuçlar
Table 3. Results obtained from test studies

Durumlar	Maliyet [TL]	Yük faktörü [0-1]	Karbon salınımı [kg]
Durum 1	3,506.21	0.256	991
Durum 2	3,755.07	0.267	1,081
Durum 3	4,013.70	0.280	1,190
Durum 4	3,496.62	0.373	1,143
Durum 5	3,761.76	0.401	1,256
Durum 6	4,026.90	0.430	1,369
Durum 7	4,326.00	0.901	1,313
Durum 8	4,555.07	0.934	1,442
Durum 9	4,768.02	0.953	1,555
Durum 10	3,775.67	0.892	1,257
Durum 11	4,026.15	0.941	1,385
Durum 12	4,273.09	0.983	1,525
Durum 13	4,144.16	0.284	1,356
Durum 14	4,747.24	0.435	1,360
Durum 15	4,937.68	0.488	1,561
Durum 16	3,749.61	0.602	1,363
Durum 17	4,014.89	0.653	1,487
Durum 18	4,280.17	0.705	1,611



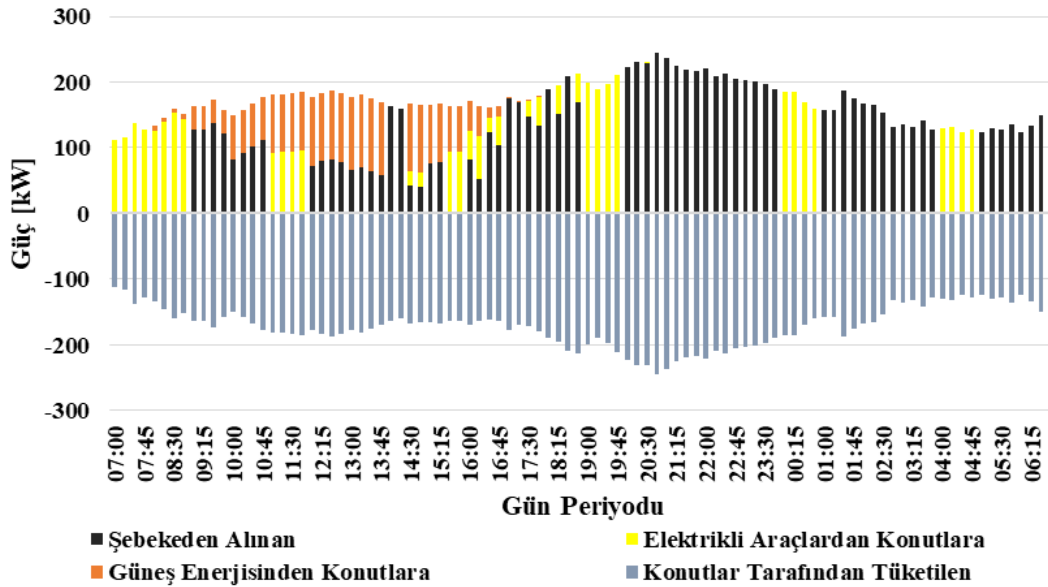
Şekil 4. Durum 1, Durum 2 ve Durum 3'te elektrik şebekesinden satın alınan güç miktarları
Figure 4. Amounts of power purchased from the electricity grid in Case 1, Case 2 and Case 3.

Durum 1, Durum 2 ve Durum 3'te elektrik şebekesinden satın alınan güç miktarları Şekil 4'te sunulmaktadır. Burada beklendiği gibi güneş enerjisi kapasitesinin artması ile şebekeden çekilen güç azalmaktadır. Durum 1, Durum 2 ve Durum 3'te elektrik şebekesinden sırasıyla 2,519.11 kWh, 2,748.04 kWh ve 3,024.38 kWh enerji tüketilmektedir. Elektrik şebekesinden çekilen güç miktarları sadece güneş enerjisi üretiminin olduğu saatlerde değişiklik gösterdiği belirtilmelidir.



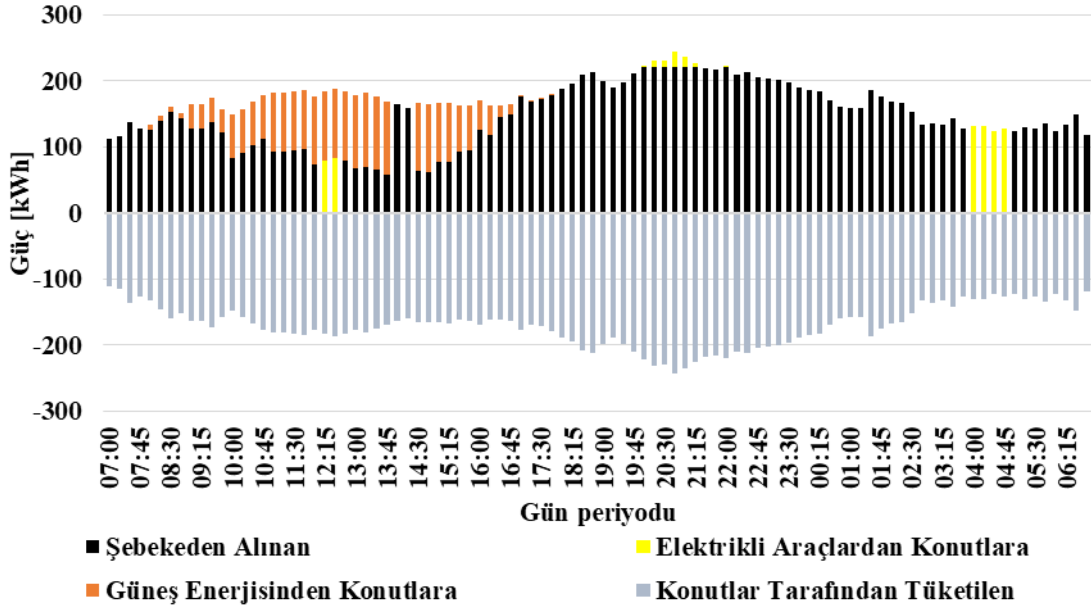
Şekil 5. Durum 7, Durum 8 ve Durum 9’da elektrik şebekesinden satın alınan güç miktarları
Figure 5. Amounts of power purchased from the electricity grid in Case 7, Case 8 and Case 9

Amaç fonksiyonunun yük faktörünü maksimize etmek olduğu Durum 7, Durum 8 ve Durum 9’da elektrik şebekesinden satın alınan güç miktarları ise Şekil 5’te sunulmaktadır. Burada Durum 1 – Durum 3’te olduğu gibi güneş enerjisi kapasitesinin artması ile şebekeden çekilen güç azalmaktadır. Durum 7, Durum 8 ve Durum 9’da elektrik şebekesinden sırasıyla 3,336.04 kWh, 3,663.58 kWh ve 3,950.55 kWh enerji tüketilmektedir. Burada önemli bir sonuç olarak güneş enerjisi kapasitesinin azalması ile şebekeden çekilen güç artmakta ve buna bağlı olarak da ortalama güç değeri yükselmektedir. Sonuç olarak bu durum yük faktörünün iyileşmesine katkıda bulunmaktadır. Durum 9’da yük faktörü Durum 7’ye göre 0.901 değerinden 0.953 değerine yükselmiştir.



Şekil 6. Durum 1’de konut bölgesi için güç dengesi
Figure 6. Power balance for the residential area in Case 1

Durum 1’de konut bölgesi için güç dengesi Şekil 6’da sunulmaktadır. Konut bölgesinin güç talebi elektrik şebekesinden, elektrikli araçlardan ve güneş enerjisi sisteminden karşılanmaktadır. Konut bölgesinin bir günlük 4,094.52 kWh enerji talebi bulunmaktadır. Bu talebin 2,519.11 kWh’i elektrik şebekesinden, 1,001.46 kWh’i elektrikli araçlardan ve 573.95 kWh’i güneş enerjisi sisteminden karşılanmaktadır.

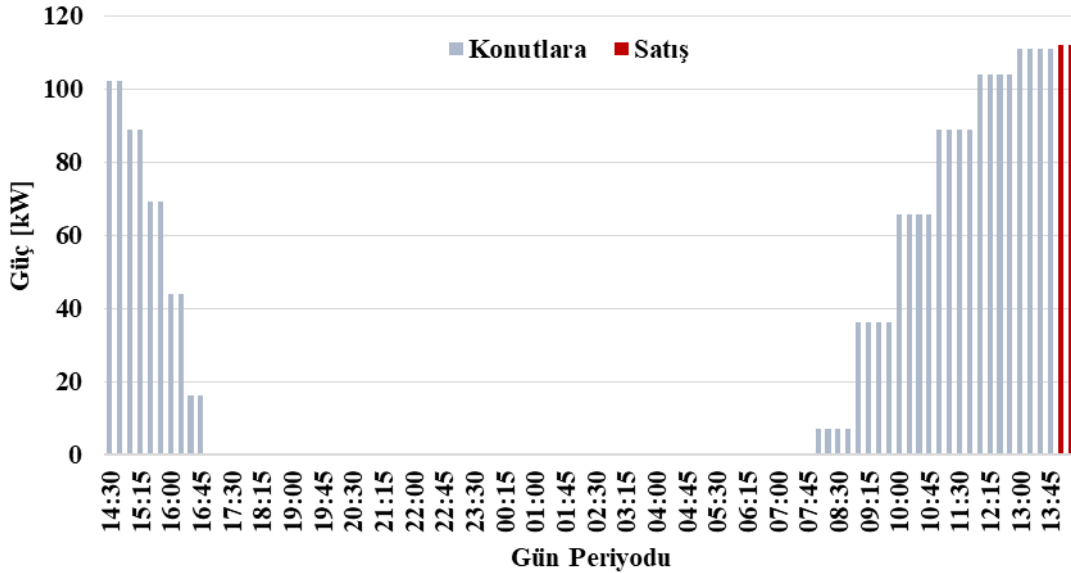


Şekil 7. Durum 7’de konut bölgesi için güç dengesi

Figure 7. Power balance for the residential area in Case 7.

Durum 7’de konut bölgesi için güç dengesi ise Şekil 7’de sunulmaktadır. Konut bölgesinin güç talebi elektrik şebekesinden, elektrikli araçlardan ve güneş enerjisi sisteminden karşılanmaktadır. Konut bölgesinin enerji talebinin 3,336.04 kWh’i elektrik şebekesinden, 184.53 kWh’i elektrikli araçlardan ve 573.95 kWh’i güneş enerjisi sisteminden karşılanmaktadır.

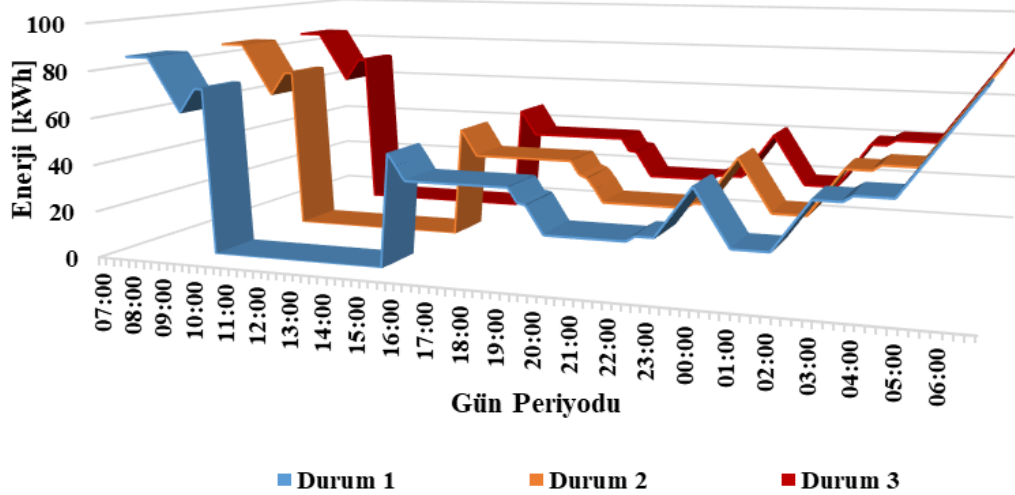
Ayrıca Durum 1’de güneş enerjisi sisteminde üretilen gücün nerede değerlendirildiği ile ilgili veri Şekil 8’de sunulmaktadır. Burada üretilen enerjinin büyük bir bölümünün konut bölgesinde değerlendirildiği sonucuna ulaşılmaktadır. Güneş enerjisi sisteminde üretilen 629.92 kWh enerjinin yaklaşık 574 kWh’i konut bölgesinde tüketilirken geri kalan kısmı ise şebekeye satılmaktadır.



Şekil 8. Durum 1’de güneş enerjisi üretiminin kullanım verisi

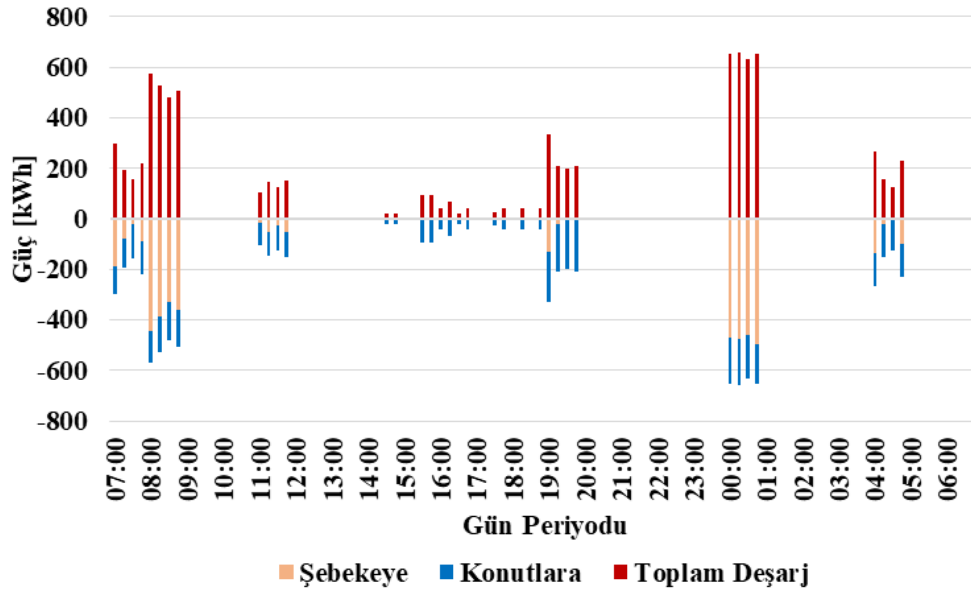
Figure 8. Usage data of solar energy production in Case 1

Durum 1, Durum 2 ve Durum 3’te elektrikli araç 22’nin enerji durumuna ilişkin veriler Şekil 9’da sunulmaktadır. Elektrikli aracın Durum 1 - Durum 3’te benzer enerji karakteristiğine sahip olduğu görülmektedir. Burada araç, toplam maliyeti minimize etmek için elektrik fiyatını da dikkate alarak şarj ve deşarj olmuştur. Aracın son zaman periyodunda istenen enerji seviyesine ulaştığının da altı çizilmelidir.



Şekil 9. Durum 1, Durum 2 ve Durum 3 elektrikli araç 22'nin enerji durumuna ilişkin veri
Figure 9. Data on the energy status of electric vehicle 22 in Case 1, Case 2 and Case 3

Durum 1'de elektrikli araçlardan deşarj edilen enerjisinin nerede kullanıldığına dair veri Şekil 10'da verilmiştir. Burada elektrikli araçlardan toplamda 2,092 kWh enerji deşarj edilmiştir. Bu enerjinin 1,091 kWh'i elektrik şebekesine satılırken, 1,001 kWh'i ise konut bölgesinde değerlendirilmiştir. Elektrikli araçlar burada amaç fonksiyonunu gerçekleştirmek için yani elektrik maliyetinin minimize etmek için birden fazla şarj ve deşarj olmuşlardır.



Şekil 10. Elektrikli araçların deşarj enerjilerinin kullanımına ilişkin veri
Figure 10. Data on the use of discharge energy of electric vehicles

4. Tartışma ve sonuçlar

4. Discussion and conclusions

Bu çalışma, güneş enerjisi ve elektrikli araçların entegrasyonunun ekonomik ve çevresel etkilerini analiz etmektedir. Güneş enerjisi kapasitesinin 150 kW olduğu durum, maliyetin en düşük olduğu senaryo olarak öne çıkmaktadır. Güneş enerjisi kullanımının olmaması günlük maliyetlerde yaklaşık 507 TL artışa neden olmaktadır. Elektrikli araçlar, konut bölgesi yüklerini destekleyerek şebeke elektrik talebini azaltmaktadır ve maliyet minimizasyonuna katkıda bulunmaktadır. Yük faktörünü maksimize eden senaryolarda, elektrikli araçların esnekliği ve şarj-deşarj süreçleri yük faktörünün 0.9'un üzerine çıkmasını sağlamaktadır. Ancak

güneş enerjisi kapasitesinin artması, şebekeden çekilen gücü azalttığı için yük faktöründe hafif bir düşüşe yol açmaktadır. Güneş enerjisinin maksimum kullanımının hedeflendiği durumlarda maliyet artarken karbon salınımı azalmaktadır ve enerji tamamen yerel olarak değerlendirilmektedir. Güneş enerjisi ve elektrikli araçların birlikte kullanımının, maliyet, çevresel sürdürülebilirlik ve sistem verimliliği açısından sinerjik faydalar sağladığı ifade edilmelidir. Gelecek çalışmalar, enerji depolama sistemleri, akıllı şebeke uygulamaları ve hidrojen enerji sistemleri gibi daha karmaşık sistem dinamiklerini, farklı yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu ve konut bölgeleri arasındaki enerji ticareti konusunu incelemeye odaklanabilir.

Teşekkür

Acknowledgement

Bu çalışma, Doç. Dr. Alper Çiçek danışmanlığında, Aslı Zaimoğlu ve Edanur İşcan tarafından TÜBİTAK 2209-A projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK’a teşekkür ederiz.

Semboller

Symbols

t	Zaman periyotları kümesi
n	Elektrikli araçlar kümesi
k	Konutlar kümesi
p_t^{sebeke}	Elektrik şebekesinden t periyodunda satın alınan güç [kW]
Δ_t	Zaman çözünürlüğü [15 dakika]
$\lambda_t^{alış}$	Elektrik şebekesinden satın alınan elektrik enerjisi için elektrik birim fiyatı [TL/kWh]
$\lambda_t^{satış}$	Elektrik şebekesine satılan elektrik enerjisi için elektrik birim fiyatı [TL/kWh]
$p_t^{YEK-seb}$	Yenilenebilir enerji kaynaklarında üretilen gücün şebekeye satılan kısmı [kW]
$p_t^{YEK-konut}$	Yenilenebilir enerji kaynaklarında üretilen gücün konut bölgesinde değerlendirilen kısmı [kW]
p_t^{ea-seb}	Elektrikli araçların toplam deşarj gücünün şebekeye satılan kısmı [kW]
$p_t^{ea-konut}$	Elektrikli araçların toplam deşarj gücünün konut bölgesinde kullanılan kısmı [kW]
YF	Konut bölgesinin yük faktörü değeri [0-1]
YF_{ters}	Konut bölgesinin yük faktörünün tersi [0-1]
$p_{t,k}^{güçtüketimi-evler}$	k konutunun t periyodundaki güç tüketimi [kW]
$p_t^{güçtüketimi-ea}$	Elektrikli araçların t periyodundaki toplam şarj gücü [kW]
p_t^{GES}	Güneş enerji santralinin t periyodundaki güç üretimi [kW]
$ED_{e,t}$	e elektrikli aracının t periyodundaki enerji durumu [kWh]
$p_{e,t}^{şarj}$	e elektrikli aracının t periyodundaki şarj gücü [kW]
$\eta^{şarj}$	Elektrikli araçların şarj verimliliği [%]
$p_{e,t}^{deşarj}$	e elektrikli aracının t periyodundaki deşarj gücü [kW]
$\eta^{deşarj}$	Elektrikli araçların deşarj verimliliği [%]
$ED_e^{başlangıç}$	e elektrikli aracının zaman periyodunun başlangıcındaki enerji durumu [kWh]
ED_e^{son}	e elektrikli aracının zaman periyodunun sonundaki enerji durumu [kWh]
$ED_e^{maksimum}$	e elektrikli araç bataryasının izin verilen maksimum enerji limiti [kWh]
$ED_e^{minimum}$	e elektrikli araç bataryasının izin verilen minimum enerji limiti [kWh]
$p_{e,t}^{şarj,maks}$	e elektrikli aracının t periyodundaki maksimum şarj gücü limiti [kW]
$p_{e,t}^{deşarj,maks}$	e elektrikli aracının t periyodundaki minimum şarj gücü limiti [kW]
N	Oldukça büyük pozitif bir sayı
$u_{e,t}$	e elektrikli aracının t periyodunda aynı anda şarj ve deşarj olmaması için kullanılan ikili karar değişkeni [0,1]
P_{ort}	Şebekeden çekilen ortalama güç [kW]
P_{maks}	Şebekeden çekilen maksimum güç [kW]

Yazar katkısı*Author contribution*

Aslı Zaimoğlu: Literatür taraması, veri toplama, modelleme, sonuçların yazılması, düzenleme. Edanur İşcan: Literatür taraması, veri toplama, modelleme, sonuçların yazılması, düzenleme. Burak Şafak: Literatür taraması, modelleme, yazılım, sonuçların yazılması, düzenleme. Alper Çiçek: Literatür taraması, modelleme, yazılım, sonuçların yazılması, düzenleme, süpervizör.

Etik beyanı*Declaration of ethical code*

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı*Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Kaynaklar*References*

- Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Chapter 9: Buildings). Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Chapter09.pdf
- Gün öncesi elektrik fiyatları | EPIAŞ ŞEFFAFLIK PLATFORMU, Çevrimiçi erişilebilir: <https://seffaflik.epias.com.tr/home>
- Huang, Z., & Wang, F., & Lu, Y., & Chen, X., & Wu, Q. (2023). Optimization model for home energy management system of rural dwellings. *Energy*, 283. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129039>
- Li, R., & SaeidNahaei, S. (2022). Optimal operation of energy hubs integrated with electric vehicles, load management, combined heat and power unit and renewable energy sources. *Journal of Energy Storage*, 48. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103822>
- Lotfi, M., & Almeida, T., & Javadi, M. S., & Osório, G. J., & Monteiro, C., & Catalão, J. P. S. (2022). Coordinating energy management systems in smart cities with electric vehicles. *Applied Energy*, 307. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118241>
- Ma, J., & Poursoleiman, R. (2022). Optimization of the home energy system in presence of price fluctuation and intermittent renewable energy sources in grid-connected and islanded modes. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 54. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102875>
- Rehman, U., Yaqoob, K., & Adil Khan, M. (2022). Optimal power management framework for smart homes using electric vehicles and energy storage. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107358>
- Renewables.ninja weather and energy data – website. Çevrimiçi erişilebilir: <https://renewables.ninja/>
- Song, Z., & Guan, X., & Cheng, M. (2022). Multi-objective optimization strategy for home energy management system including PV and battery energy storage. *Energy Reports*, 8, 5396–5411. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.04.023>
- Tostado-Véliz, M., & Hasanien, H. M., & Kamel, S., & Turkey, R. A., & Jurado, F., & Elkadeem, M. R. (2023). Multiobjective home energy management systems in nearly-zero energy buildings under uncertainties considering vehicle-to-home: A novel lexicographic-based stochastic-information gap decision theory approach. *Electric Power Systems Research*, 214, Part B. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108946>

- Wu, Y., & Aziz, S. M., & Haque, M. H. (2022). Techno-economic modelling for energy cost optimisation of households with electric vehicles and renewable sources under export limits. *Renewable Energy*, 198, 1254–1266. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.066>
- Yan, Z., & Duan, X., & Chang, Y., & Xu, Z., & Sobhani, B. (2023). Optimal energy management in smart buildings with electric vehicles based on economic and risk aspects using developed whale optimization algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 415. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137710>
- Zhu, J. R., & Jin, Y., & Zhu, W., & Lee, D. K., & Bohlooli, N. (2023). Multi-objective planning of micro-grid system considering renewable energy and hydrogen storage systems with demand response. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48 (41), 15626–15645. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.279>