

Atıf İçin: İncili, V. ve Aktar, A. K. (2025). Akıllı Şebeke Ortamında PV/T Destekli Isı Pompası ile Bir Müstakil Evin Elektrik ve Isı Enerjisi Yönetimi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15(3), 889-903.

To Cite: İncili, V. & Aktar, A. K. (2025). Electricity and Heat Energy Management of a Detached House with PV/T Assisted Heat Pump in a Smart Grid Environment. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 15(3), 889-903.

Akıllı Şebeke Ortamında PV/T Destekli Isı Pompası ile Bir Müstakil Evin Elektrik ve Isı Enerjisi Yönetimi

Veysel İNCİLİ¹, Abdullah Kürşat AKTAR^{1*}

Öne Çıkanlar:

- PV/T destekli ısı pompası tasarımı
- Isı ve elektrik talebinin karşılanması
- Enerji depolama yöntemiyle kazanç elde etme

Anahtar Kelimeler:

- Akıllı şebeke
- Enerji depolama
- Enerji yönetimi
- Isı pompası
- PV/T sistem
- Yenilenebilir enerji

ÖZET:

Enerji alanında hızlı gelişen teknolojiler ve çeşitlenen ürünler tüketicilerin elektrik ve ısı ihtiyacını farklı yöntemlerle karşılayabilmesi imkanını artırmaktadır. Özellikle enerji geçişi kavramının ortaya atılması ile çeşitli sektörlerde ihtiyaç duyulan enerji ağırlıklı olarak elektrik enerjisi tarafına kaymaktadır. Ayrıca, fosil kaynakların çevreye zararlı olması, elektrik şebekesinde yenilenebilir enerjinin nüfuzunun artmasını desteklemektedir. Oluşan teknik ve hukuki altyapı, tüketicilerin hem üretici hem tüketici rolünü üstlenmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada, bir müstakil evin elektrik ve ısıtma ihtiyacını karşılamak üzere analizler ve tasarımlar yapıldıktan sonra, eve ait enerji depolama sistemi sayesinde dinamik elektrik piyasasında ekonomik fayda amaçlanmaktadır. İlk aşama olarak evin ısı kaybı hesabı yapılarak eve uygun PV/T destekli ısı pompası tasarlanmaktadır. İkinci aşamada akıllı şebeke ortamında hem ihtiyaçların karşılanması hem de gelir elde edilmesi hedeflenmektedir. Tasarlanan PV/T destekli ısı pompası piyasa koşullarına uygun COP ve verimlilik değerlerini elde ederken, oluşturulan algoritmanın etkinliği 6 farklı senaryo ile test edilmektedir. Senaryoların tamamında elektrik ve ısıtma ihtiyacı sorunsuz karşılanırken, 5 senaryoda kazanç elde edilmektedir. PV üretimi ve ısıtma talebi üzerinde nisan ayı olumlu etki ürettiğinden en iyi kazanç Senaryo 5'te 198.55 \$ olarak elde edilmektedir. Sonuç olarak, enerji üretimi kapasitesine sahip evler, elektrik şebekesinde aktif rol oynayarak hem ihtiyaçlarını karşılayıp hem de ekonomik avantajlar elde edebilirler.

Electricity and Heat Energy Management of a Detached House with PV/T Assisted Heat Pump in a Smart Grid Environment

Highlights:

- PV/T assisted heat pump design
- Meeting heat and electricity demand
- Generating income through energy storage

Keywords:

- Smart grid
- Energy storage
- Energy management
- Heat Pump
- PV/T system
- Renewable energy

ABSTRACT:

Rapidly developing technologies and diversifying products in the field of energy increase the ability of consumers to meet the electricity and heat needs in various ways. Particularly with the concept of energy transition being introduced, the energy needed in various sectors is shifting primarily to the electrical energy side. Moreover, the environmental impacts of fossil resources support the increasing penetration of renewable energy in the electricity grid. The emerging technical and legal infrastructure enables consumers to play the role of both producers and consumers. In this study, after analyzing and designing to meet the electricity and heating needs of a private house, the economic benefit in the dynamic electricity market is aimed through the energy storage system of the house. In the first stage, the heat loss of the house is calculated and a PV/T-supported heat pump suitable for the house is designed. In the second stage, it is aimed to both satisfy the needs and generate income in a smart grid environment. While the designed PV/T assisted heat pump achieves COP and efficiency values suitable for commercial standards, the effectiveness of the algorithm is tested with 6 different scenarios. In all scenarios, electricity and heating demands are fulfilled without any trouble, while income is achieved in 5 scenarios. The best revenue is obtained in Scenario 5 at \$198.55 since a positive impact on PV production and heating demand is generated in April. As a conclusion, houses with energy generation capacity can play an active role in the electric grid, covering the needs and providing economic benefits at the same time.

¹ Veysel İNCİLİ ([Orcid ID: 0000-0003-1786-1790](https://orcid.org/0000-0003-1786-1790)), Abdullah Kürşat AKTAR ([Orcid ID: 0000-0003-3185-452X](https://orcid.org/0000-0003-3185-452X)), Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Muğla, Türkiye

***Sorumlu Yazar/Corresponding Author:** Abdullah Kürşat AKTAR, e-mail: kursataktar@mu.edu.tr

GİRİŞ

Günümüzde nüfus artışı ve artan enerji ihtiyacı, enerji kaynaklarının kömür, petrol ve doğalgaz gibi geleneksel fosil yakıtların eksikliği ve sera gazı emisyonlarındaki artış, iklim değişikliği ve küresel ısınmaya neden olmaktadır (Abbas ve ark., 2022). Bu durumun etkilerini azaltmak veya ortadan kaldırmak için 130'dan fazla ulusal hükümet, COP28 iklim değişikliği konferansında dünyanın kurulu yenilenebilir enerji kapasitesini 2030 yılına kadar en az 11.000 GW'a çıkarmak için hedef belirlemiştir (EIA, Renewables Analysis and forecast to 2028, 2023).

Konutlardaki enerji talebinin yarısından fazlası mahal ve su ısıtması ile ilişkilidir. Bu nedenle, mahal ve su ısıtmada verimliliğin artırılması ve yenilenebilir enerjinin kullanılması bu hedefe önemli bir katkı sağlayabilir (Erdoğan ve ark., 2023). Yenilenebilir enerji teknolojileri arasında öne çıkan güneş fotovoltaik termal (PV/T) sistemleri hem elektrik hem de ısı enerjisini aynı anda üretebilme kapasitesi ile dikkat çekmektedir. PV/T teknolojisi, bina termal konforu, kurutma, soğutma, iklimlendirme, tuzdan arındırma ve endüstriyel proses ısısı gibi çeşitli uygulama alanlarında etkin şekilde kullanılmaktadır (Chandrasekar ve ark., 2021). Bu kolektörlerin kullanılmasıyla, yalnızca elektrik üreten fotovoltaik (PV) panellerde sıcaklık yükselmesinden kaynaklanan verim kayıpları önlenirken, aynı zamanda toplam enerji üretim verimliliği artırılmış olur. PV/T kolektörlerin yaygınlaşmasıyla, sadece ısı veya elektriksel enerji üreten sistemlerin verimine kıyasla, daha yüksek bir toplam sistem verimi elde edilebilir. Böylece, temiz, yenilenebilir ve doğa dostu güneş enerjisinden maksimum düzeyde faydalanılmaktadır (Kırtepe ve Güngör, 2019).

PV/T sistemleri ile ısı pompaları arasındaki ilişkiyi değerlendirdiğimizde, PV/T kolektörlerinin, PV panellerinin sıcaklığını önemli ölçüde düşürerek enerji üretim verimliliğini artırdığı görülmektedir (Zhang ve ark., 2023). Öte yandan, binaların enerji talebi toplam enerji arzının %40'ını kapsamakta ve binalar CO₂ emisyonlarının yaklaşık %35'inden sorumludur (IEA, Net Zero by 2050, 2021). Bu bağlamda, enerji verimli sistemler olan ısı pompalarının kullanımı, sürdürülebilir enerji çözümleri açısından büyük önem taşımaktadır. Isı pompalarının performansı esas olarak evaporatörün yerleştirildiği ısı kaynağının sıcaklığına bağlıdır. Güneş enerjisi destekli termal kolektörler (Solar Thermal Collector: STC), evaporatör sıcaklığını artırarak ısı pompalarına ek bir termal destek sağlayabilir (Duarte ve ark., 2019). PV/T paneli, doğrudan genişleme olarak bilinen ısı pompası evaporatörünün üzerine yerleştirilebilir. Dolaylı genişleme durumunda ise PV/T panelinden çıkarılan ısının kapalı bir ikincil su devresi kullanılarak ısı pompasına iletilmesi sağlanır (Petrucci ve ark., 2024).

Isı pompaları, yüksek verimli sistemler olmaları nedeniyle konutlarda sıklıkla tercih edilmektedir. Soğutma sistemleri için neredeyse alternatifsiz bir seçenek sunan ısı pompaları, aynı zamanda ısıtma ihtiyacını karşılamak için de yaygın olarak kullanılmaktadır. Geleneksel olarak kömür veya doğalgaz ile ısıtma yöntemleri düşük ilk yatırım maliyetleri nedeniyle daha ekonomik görünse de ısı pompaları uzun vadede daha düşük enerji tüketimi ve karbon emisyonu ile çevre dostu bir alternatif oluşturmaktadır. Özellikle soğuk kış aylarında, yazın soğutma amacıyla kullanılan aynı ısı pompasının ters çevrimle ısıtma için kullanılması ekonomik açıdan avantaj sağlamaktadır (Sezen ve Güngör 2023).

Çeşitli çalışmalar, PV/T destekli ısı pompalarının enerji tüketimini önemli ölçüde azaltarak verimlilik açısından avantaj sağladığını göstermektedir. Örneğin, Xie vd. yaptıkları çalışmada, çift serpantinli hava soğutmalı PV/T destekli değişken kapasiteli hava kaynaklı ısı pompasının, yalnızca hava kaynaklı ısı pompası kullanılan bir sisteme kıyasla %88 oranında daha az enerji tükettiğini belirtmektedirler (Xie ve ark., 2024). Benzer şekilde, Li vd. gerçekleştirdikleri araştırmada, MHP-PV/T-ASHP ısıtma sisteminin, SETWH-ASHP sistemine göre güneş enerjisi katkısında %19 artış, sistem

enerji verimliliğinde 2,2 kat artış ve CO₂ emisyonlarında 494,7 kg azalma sağladığını ortaya koymaktadırlar (Li ve ark.,2024).

PV/T sistemler ve termoelektrik dönüştürücüler ile entegre edilmiş, termal enerji depolamalı bir güneş kurutucusunun incelendiği çalışmada Singh ve ark., (2025) şebekeden bağımsız çalışırken üretilen elektrik enerjisi, kurutucunun fanlarını beslemek için yeterli gelirken, enerji depolamanın kurutucunun çalışma süresini uzatarak enerji verimliliğini iyileştirdiğini göstermektedir. Termal enerji depolama ve batarya enerji depolama ile entegre edilmiş fotovoltaik ısı pompası (PV-HP) sistemi tasarımı yapılan başka bir çalışmada Zhang ve ark. (2025) ise şebeke bağlantılı sistemlerin daha yüksek esneklik, ekonomik ve çevresel avantajlar sunduğunu göstermektedir.

Diğer yandan, PV/T sistemlerinin hem ısı hem elektrik ihtiyacını karşılamaya yönelik kurulumu, gelişen akıllı şebeke teknolojisi içerisinde önemli faydalar sağlayabilir. Tüketicilerin tek bir tedarikçiden enerji almak yerine sahip olduğu üretim ve depolama sistemleri sayesinde şebekede aktif rol oynaması şebeke yönetimi üzerinde zorlayıcı durumlar oluşturduğu gibi avantajlar da sağlamaktadır (Aktar, 2025). Özellikle değişken fiyatların bulunduğu şebekelerde batarya sistemleri ile pahalı ve ucuz fiyat dönemleri arasında enerji transferi sağlayarak ekonomik faydalar elde edilebilmektedir (Aktar ve Karakılıç, 2024). PV/T panelleri ve ısı depolama ünitesi içeren bir akıllı bina enerji sisteminin incelendiği çalışmada Behzadi ve Arabkoohsar (2020), sistemin elektrik ve ısı şebekeleriyle çift yönlü enerji alışverişi yaparak bina enerji maliyetlerini dengelediğini ve yenilenebilir enerji kullanımını artırdığını göstermektedir.

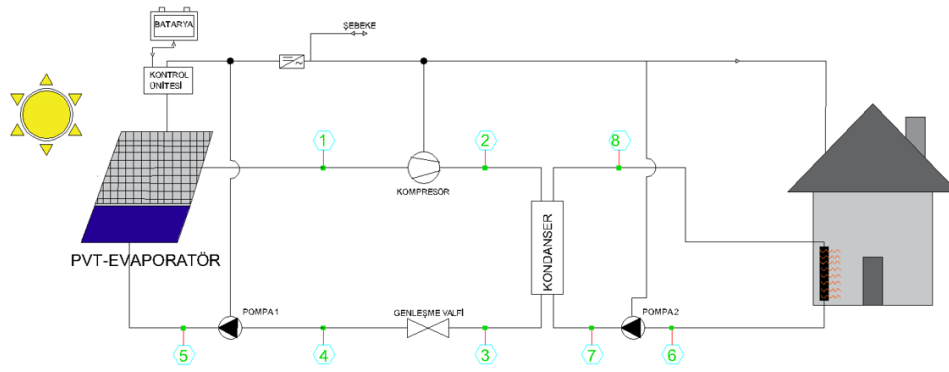
Özetle, PV/T destekli ısı pompaları hem enerji verimliliği hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Bu sistemlerin yaygınlaşmasıyla birlikte, binaların enerji ihtiyacını daha düşük karbon ayak iziyle karşılamak mümkün hale gelmektedir. Yapılan çalışmalar, çeşitli PVT ve ısı pompası sistemlerinin, enerji maliyetlerini azaltırken, aynı zamanda yenilenebilir enerji kullanımını artırarak fosil yakıtlara olan bağımlılığı azalttığını göstermektedir.

Bu çalışmada bir müstakil evin Ocak ve Nisan aylarındaki seçilen günlere ait ısı kaybı analiz edilerek, PV/T destekli ısı pompası ile ısıtılması hedeflenmektedir. Ayrıca, evin sahip olduğu PV sistemi sayesinde elektrik ihtiyacı karşılanırken, depolama sistemi yardımıyla ucuz zaman aralığında enerji depolayarak pahalı zamanda kullanım ya da satış yoluyla ekonomik fayda elde etmesi amaçlanmaktadır. Böylece yenilenebilir enerji kaynağı kullanarak elektrik ve ısı üretimi yapan bileşenler ile kendine yeten bir müstakil ev tasarlanmaktadır. Dahası, akıllı şebeke ortamında aktif rol oynayarak zamansal fiyat farklılıklarından faydalanarak gelir elde edilmesi planlanmaktadır.

MATERYAL VE METOT

Bir Müstakil Eve Ait PV/T Destekli Isı Pompası Tasarımı

Eve ait PV/T destekli ısı pompası sistemi Şekil 1’de gösterildiği gibi PV/T kollektör, ısı pompası ünitesi, pompalar, enerji depolama ünitesi, invertör, kontrol ünitesinden oluşmaktadır. PV/T destekli ısı pompası sisteminin Çizelge 1’de özellikleri verilen binaya ait elektrik ve ısıtma ihtiyacını karşılayacak şekilde sistem analizleri yapılmaktadır. Isı pompası ile binanın saatlik ısı kaybını karşılamak ve bunun yanında binanın elektrik ihtiyacının ve PV/T destekli ısı pompasında kullanılan kompresör ve pompalara ait elektrik enerjisinin karşılanması da inceleme konusudur. PV/T destekli ısı pompası sistemi Muğla Meteoroloji Müdürlüğünden elde edilen veriler ile analiz edilmektedir. Dış ortam sıcaklığı ve güneş ışıınımı değerlerinin Ocak ve Nisan aylarındaki değişimi dikkate alınarak hesaplamalar yapılmaktadır. Isı pompası, ısıtma modunda PV/T sisteminden gelen elektrik ve ısı enerjisini kullanmaktadır.

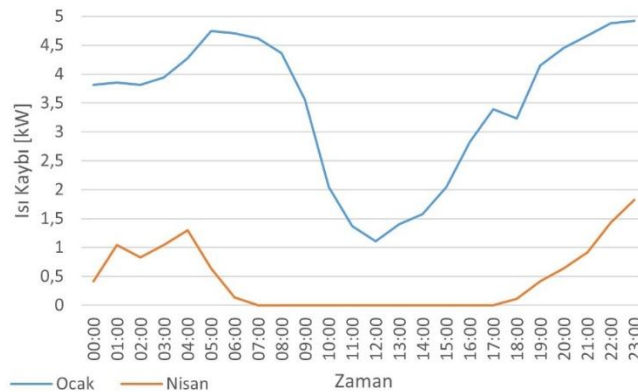


Şekil 1. PV/T destekli ısı pompası sisteminin şematik gösterimi

Çizelge 1’de özellikleri verilen binaya ait ısı geçirgenlik katsayıları, gerekli pencere ve kapı açıklıkları, yönleri uygulaması yapılmış bir mimari projeden alınmıştır. Bu veriler ile Ocak ve Nisan aylarındaki bir güne ait meteorolojik verilerle yapılan ısı kaybı hesabı sonucunda elde edilen saatlik değerler Şekil 2’de görülmektedir. TS825’de yapılan hesaplamaların aylık ortalama değerler olması nedeniyle Engineering Equation Solver (EES) programı seçilerek saatlik ısı kaybı hesabı yapılmıştır (TSE, 2021).

Çizelge 1. Isı kaybı hesabında dikkate alınan özellikler

Özellik	Değer
Bina Toplam Alanı	199 m ²
Özgül Isı Kaybı	449.050 W/K
Pencere Alanları	Kuzey 0.5 m ² Güney 10 m ² Batı 10 m ² Doğu 8 m ²
Cihaz Güçleri	500 W
Aydınlatma Güçleri	500 W
Kişi Sayısı	100 W
	4 kişi



Şekil 2. Eve ait Ocak ve Nisan aylarındaki ilgili günlere ait ısı kaybı

Tasarlanan binaya ait enerji analizi hesabında kullanılan formüller Eşitlik (1) – (12) ile verilmektedir. PV/T destekli ısı pompasının termodinamik analizleri EES programı aracılığıyla yapılmaktadır. PV/T destekli ısı pompası güneş ışıınımı olmadığı zamanlarda hava kaynaklı ısı pompası gibi çalışmakta, güneş ışıınımı mevcut olduğunda ise evaporatöre ısı PV/T’den sağlanan sıcak su ile sağlanmaktadır. Hesaplamalarda güneş ışıınımı olduğu zamanlarda evaporatöre giren su sıcaklığı 10 °C olarak kabul edilmiştir. Bu sıcaklığın üzerine radyasyondan kaynaklı sıcaklık farkının Eşitlik (3)’ten elde edilerek Eşitlik (4)’te eklenmesiyle evaporatör sıcaklığı bulunmaktadır. Evaporatörden çekilen ısı Eşitlik (5), kondanserden atılan ısı Eşitlik (6), kompresörün ihtiyaç duyduğu enerji Eşitlik (7) ile

incelenen tüm zaman aralıkları için hesaplanmaktadır. Sistemin verimliliği ise (COP_{IP}) Eşitlik (8) ile pompa güçleri ($\dot{W}_{comp.}$) ise Eşitlik (11) ile verilmektedir. Binaya ait TS825’de verilen aylık ısı ihtiyacı hesabı Eşitlik (12) ile verilmektedir. Sistemde kullanılan soğutucu akışkana ait özellikler Çizelge 2’de verilmektedir (Yakut, 2017).

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_c \quad (1)$$

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_g h_g = \dot{W}_{net} + \sum \dot{m}_c h_c \quad (2)$$

$$\Delta T = \frac{A \cdot G \cdot \eta_T}{\dot{m} C_p} \quad (3)$$

$$T_{evap,in} = T_{in} + \Delta T \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}(h_1 - h_5) \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{kond.} = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (6)$$

$$\dot{W}_{comp.} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (7)$$

$$COP_{IP} = \frac{\dot{Q}_{kond.}}{\dot{W}_{comp.}} \quad (8)$$

$$H_{sürtünme} = f \cdot \left(\frac{L}{D} \right) \cdot \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad (9)$$

$$H_{toplam} = H_{statik} + H_{sürtünme} \quad (10)$$

$$P_{pompa} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_{toplam}}{\eta_{pompa}} \quad (11)$$

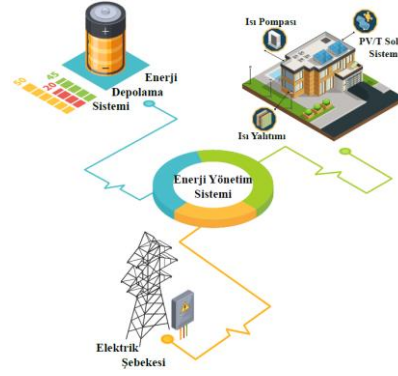
$$Q_{ay} = [H \cdot (T_{i,ay} - T_{d,ay}) - \eta_{ay} \cdot (\phi_{i,ay} + \phi_{g,ay})] \cdot t \quad (12)$$

Çizelge 2. PV/T Destekli Isı Pompasında Kullanılan R32 Soğutucu Akışkanın Özellikleri

R32	Özellik	Birim
Kimyasal Formül	CH ₂ F ₂	-
Moleküler Ağırlık	52.02	g/mol
Kaynama Noktası	-51.7	°C
Kritik Sıcaklık	78.1	°C
Kritik Basıncı	5.78	MPa
Ozon Tüketim Potansiyeli (ODP)	0.0	-
Küresel Isınma Potansiyeli (GWP)	675	-
Buharlaşma Gizli Isısı	390	kJ/kg
Yoğunluk (Sıvı, 25°C)	958	kg/m ³
Alevlenebilirlik Sınıfı	A2L	(Hafif Yanıcı)
Termal İletkenlik	0.081	W/m·K
Basıncı Oranı (R410A'ya kıyasla)	%60 daha yüksek	-

Tasarlanan Sistemin Akıllı Şebeke Ekosisteminde Yer Alması

Çalışmada ilk aşama olarak, önerilen modelde yer alan eve ait PV/T destekli hava kaynaklı ısı pompası sistemi ele alınmaktadır. İkinci aşamada ise tasarlanan evin akıllı şebeke sistemi içerisinde hem elektrik hem ısı ihtiyacının ekonomik ve teknik olarak sürdürülebilirliği irdelenmektedir. Evin çatısında yer alan PV/T sistemindeki paneller güneş ışınımının olduğu saatlerde evsel yük talebi ile ısıtma sisteminin enerji ihtiyacını desteklemektedir. Ayrıca, evin enerji depolama sistemi (EDS) sayesinde üretimin tüketimden fazla olduğu zaman aralıklarında enerji depolaması yapılabilmektedir. EDS enerji fiyatlarının değişken olduğu piyasalarda enerji alışverişi yaparak ek gelir elde etmek veya enerji maliyetlerini azaltmak için kullanılabilir. Sistem bileşenlerinin birbirleri ile etkileşimi Şekil 3’te gösterilmektedir.



Şekil 3. Eve ait bileşenlerin etkileşimini gösteren diyagram

Geliştirilen sistemde temel hedef, PV/T sistemine sahip evin elektrik ve ısı enerji ihtiyacını piyasa elektrik fiyatını da dikkate alarak optimum seviyede karşılamaktır. Eşitlik (13) – (24) ile verilen ifadeler sistem bileşenlerinin birbirleri arasındaki güç ilişkilerini ve kısıtlarını ifade etmektedir.

Oluşturulan optimizasyon algoritması karma tam sayılı doğrusal programlama yöntemine dayalı çalışmaktadır. Eşitlik (13)'deki amaç fonksiyonunda yer alan $P_t^{Satış}$ ve $P_t^{Alış}$ evin t zaman aralığında şebekeden satın aldığı ve şebekeye sattığı gücü ifade ederken, λ_t^{Fiyat} değişkeni piyasa elektrik fiyatını temsil etmektedir. Eşitlik (14) 'deki P_t^{PV} , $P_t^{EDSdeşarj}$ ve $P_t^{Alış}$ değişkenleri evin enerji temin ettiği bileşenleri temsil ederken Eşitlik (15)'teki P_t^{YT} , P_t^{IP} , $P_t^{EDSşarj}$ ve $P_t^{Satış}$ değişkenleri sırasıyla evsel yük talebini, ısı pompası yük talebini, EDS şarj gücünü ve şebekeye aktarılan gücü belirtmektedir. Isı ihtiyacının karşılanması amacıyla tasarlanan sistem çıktıları sayesinde kompresör gücü (P_t^C) ve pompa güçlerinin (P_t^P) ayrı ayrı hesaplanarak toplanmasıyla Eşitlik (16)'te belirtilen P_t^{IP} tespit edilir. Şebekeden enerji alışı ve şebekeye enerji satışının aynı anda gerçekleşmemesi adına u_t^1 ikili değişkeninden Eşitlik (17) – (18)'de gösterildiği şekilde faydalanılır.

EDS'nin şarj vedeşarj gücü $R_i^{EDSşarj}$ ve $R_i^{EDSdeşarj}$ parametreleri ile sınırlanarak Eşitlik (19) – (20) de gösterildiği aralıkta gerçekleşmesi sağlanır. Ayrıca Eşitlik (21)'da görüldüğü gibi u_t^2 ve u_t^3 ikili değişkenleri ile EDS'nin eş zamanlı şarj vedeşarjı önlenir. Her bir zaman aralığında yapılan operasyonlar sonucunda batarya enerji durumu (ED) değişikliğe uğramaktadır. Son ED değerinin tespiti Eşitlik (22)'de görüldüğü gibi şarj sonucu gelen enerjinin eklenmesi veyadeşarj sonucu aktarılan enerjinin çıkarılması ile tespit edilir. Tüm operasyonlar Eşitlik (23)'de belirtilen ED sınırları içerisinde kalarak gerçekleştirilirken, test sürecinin başlangıç değeri Eşitlik (24) ile tayin edilir.

$$\text{Maksimize } ETM = \sum_t ((P_t^{Satış} - P_t^{Alış}) \cdot \lambda_t^{Fiyat}) \quad (13)$$

Aşağıdaki denklemlere bağlı olarak:

$$P_t^{\dot{U}} = P_t^{PV} + P_t^{EDSdeşarj} + P_t^{Alış} \quad \forall t \quad (14)$$

$$P_t^T = P_t^{YT} + P_t^{IP} + P_t^{EDSşarj} + P_t^{Satış} \quad \forall t \quad (15)$$

$$P_t^{IP} = P_t^C + P_t^P \quad (16)$$

$$P_t^{Alış} \leq N \cdot u_t^1 \quad \forall t \quad (17)$$

$$P_t^{Satış} \leq N \cdot (1 - u_t^1) \quad \forall t \quad (18)$$

$$0 \leq P_t^{EDSşarj} \leq R^{EDSşarj} \cdot u_t^2 \quad \forall t \quad (19)$$

$$0 \leq P_t^{EDSdeşarj} \leq R^{EDSdeşarj} \cdot u_t^3 \quad \forall t \quad (20)$$

$$u_t^2 + u_t^3 \leq 1 \quad \forall t \quad (21)$$

$$ED_t^{EDS} = ED_{(t-1)}^{EDS} + \left(\dot{V}^{ESS} \cdot P_t^{EDS\text{şarj}} - \frac{P_t^{EDS\text{deşarj}}}{DV^{EDS}} \right) \cdot \Delta T \quad \forall t \quad (22)$$

$$ED_t^{EDS,min} \leq ED_t^{EDS} \leq ED_t^{EDS,max} \quad \forall t \quad (23)$$

$$ED_t^{EDS} = ED_t^{EDS,ilk} \quad \text{eğer } t = 1 \quad (24)$$

Giriş Verisi

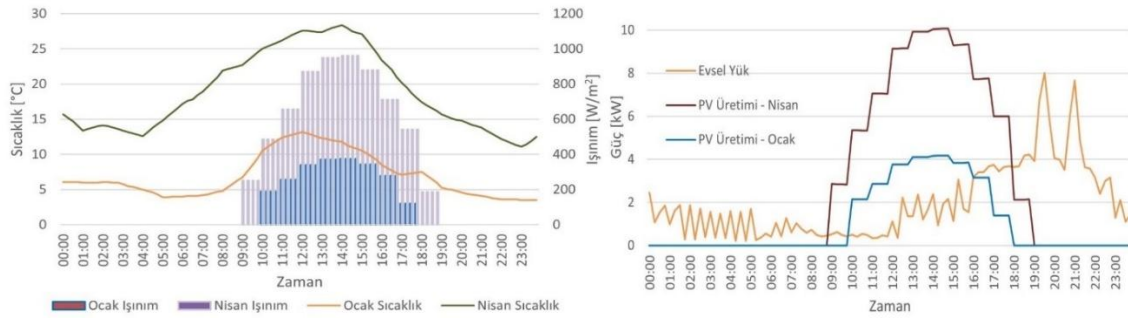
Oluşturulan algoritmanın etkinliğini test etmek adına Muğla iline ait meteorolojik veriler kullanılarak yaklaşık 10 kW kurulu gücündeki PV sistemin Nisan ve Ocak ayında seçilen günler için üretim eğrisi Eşitlik (25) vasıtasıyla hesaplanır. Burada P_t^{PV} sistem çıkışı, N_{PV} kullanılan panel sayısını, P_{RPV} her bir panelin çıkış gücünü, Irr_t anlık güneş radyasyonunu, Irr_0 standart şartlardaki güneş radyasyonunu, N_T panelin sıcaklık katsayısını, T_t hava sıcaklığını, $NOCT$ normal operasyondaki hücre sıcaklığını ve T_0 standart şartlardaki hava sıcaklığını temsil eder.

$$P_t^{PV} = N_{PV} \cdot P_{RPV} \cdot \frac{Irr_t}{Irr_0} \cdot \left(1 + N_T (T_t + Irr_t \cdot \frac{NOCT - 20}{800} - T_0) \right) \quad \forall t \quad (25)$$

Seçilen PV panele ait değerler Çizelge 3'te verilmektedir. Ayrıca hesaplamalara konu olan günlerdeki sıcaklık ve güneş ışınımına ait değişim Şekil 4 (a)'da gösterilmektedir. Daha önce Eşitlik (13) ile hesaplanan PV üretim değerleri ve evsel yük talebi Şekil 4 (b)'de gösterilmektedir.

Çizelge 3. Kullanılan PV panele ait parametreler

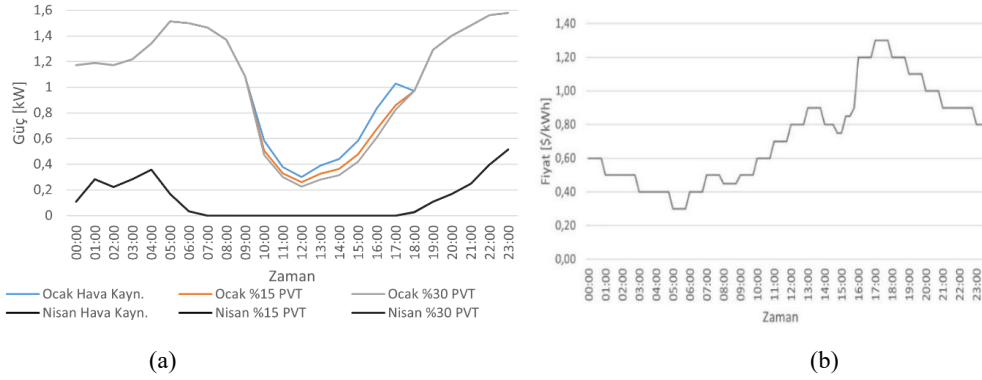
Parametre	Değer	Parametre	Değer
N_{PV}	18 adet	N_T	-0,0034
P_{RPV}	550W	$NOCT$	43°C
Irr_0	1000W/m ²	T_0	25°C



Şekil 4. Seçilen günlerdeki sıcaklık ve güneş ışınımı (a) ve eve ait yük talebi ve PV sistemi üretimi (b)

Oluşturulan sistem farklı durumlar üzerinden test edildiğinden ilgili güne ait kompresör güç talebi EES programında oluşturulan simülasyon ile tespit edilmektedir. Farklı gün ve sistem boyutlarına ait simülasyon sonuçları Şekil 5 (a)'da verilmektedir. Ayrıca bağlı bulunulan şebekede uygulanan değişken elektrik fiyat mekanizması Şekil 5 (b)'de görüldüğü gibidir.

Evin enerji ihtiyacının karşılanmasında fiyat değişiminden olumlu faydalanabilmek, PV üretiminin kesintili ve ısıtma ihtiyacı ile ters orantılı olmasından kaynaklı dezavantajı ortadan kaldırmak adına EDS'den yararlanılmaktadır. Şarj vedeşarj operasyonları verilen sınırlamalar dahilinde gerçekleşirken, test süresi sonunda oluşturulan sistem üzerinde etki üretmemesi için EDS içindeki enerjinin başlangıç değerine eşit olması istenmektedir. EDS'ye ait parametreler Çizelge 4'te verilmektedir.



Şekil 5. Farklı PV/T sistem boyutlarına göre kompresör güç talebi (a) ve elektrik fiyatı değişimi grafiği (b)

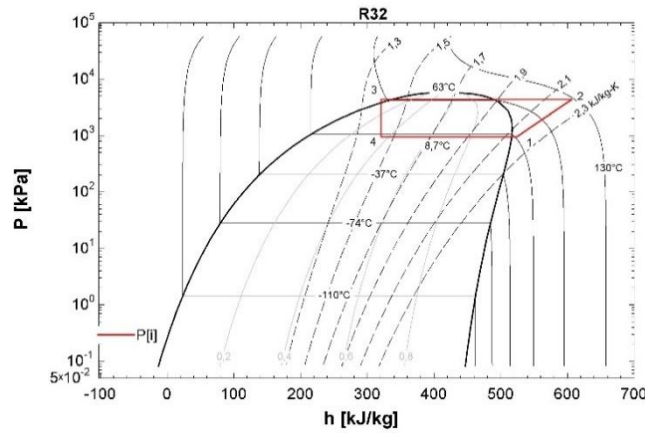
Çizelge 4. EDS'ye ait parametreler

Parametre	Değer	Parametre	Değer
$\dot{V}^{ESS}$	0,95	$ED^{EDS,min}$	8
DV^{ESS}	0,95	$ED^{EDS,maks}$	250
$R^{EDS\text{şarj}}$	65 kW	$ED^{EDS,ilk}$	30
$R^{EDS\text{deşarj}}$	65 kW		

BULGULAR VE TARTIŞMA

Tasarlanan PV/T Destekli Isı Pompasına ait Bulgular

Tasarlanan PV/T destekli ısı pompasının herhangi bir durumu için, örneğin Şekil 6'deki sıcaklık aralıklarında, R32 soğutucu akışkanına ait P-h diyagramı gösterilmektedir.

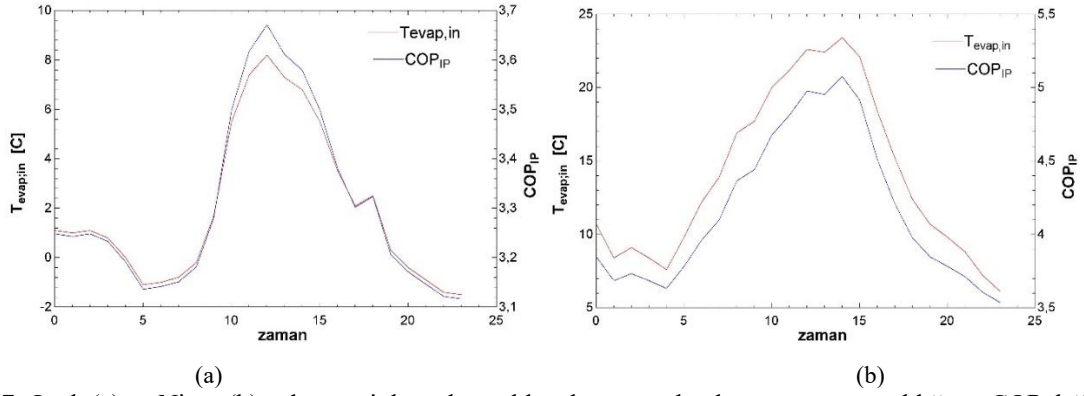


Şekil 6. R32 soğutucu akışkanına ait P-h diyagramı

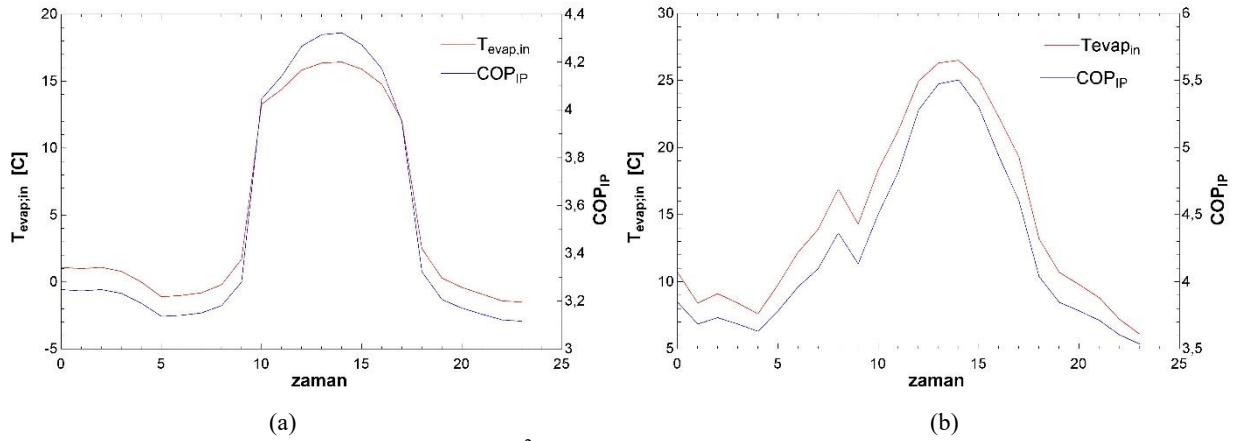
PV/T destekli ısı pompası Ocak ve Nisan aylarında Muğla iklim koşullarında çalıştırılmaktadır. Öncelikle ilgili Ocak ve Nisan aylarında hava kaynaklı ısı pompası moduna ait parametrelerden evaporatör sıcaklığı ve buna bağlı olarak COP'deki değişim Şekil 7 (a) ve (b)'de gösterilmektedir.

Şekil 8 (a) ve (b)'de Ocak ve Nisan aylarında toplam PV alanının %15'i olan 6m² PV/T kullanımına bağlı olarak evaporatör sıcaklığı ve COP'deki değişim gözlenmektedir. Ocak ayında saat 10:00 ile 17:00, Nisan ayında ise 09:00-18:00 saatleri aralığında güneş ışınımına bağlı olarak ısı pompası PV/T destekli olarak, ışınımın olmadığı zamanlar da ise hava kaynaklı olarak çalışmaktadır.

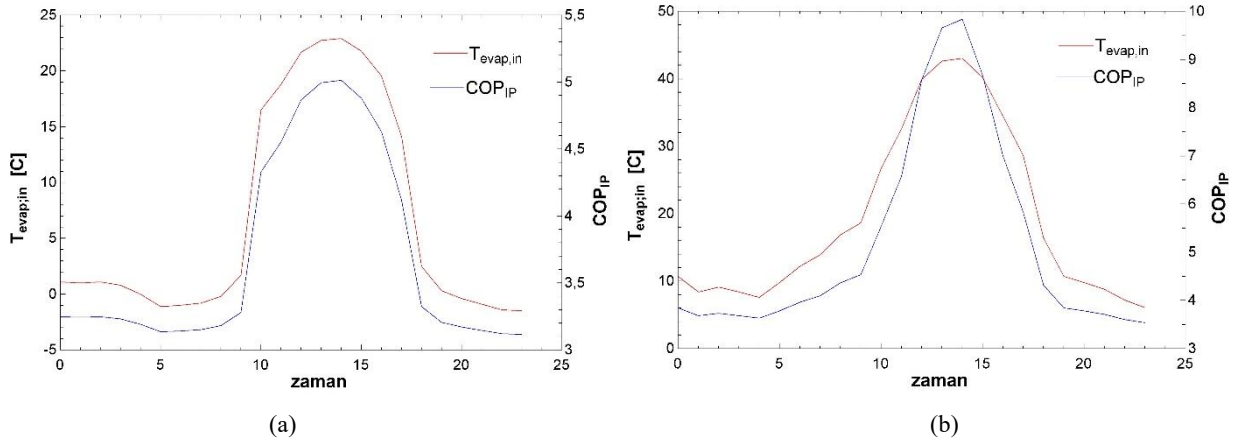
Şekil 9 (a) ve (b)'de Ocak ve Nisan aylarında toplam PV alanının %30'u olan 12m² PV/T kullanımına bağlı olarak evaporatör sıcaklığı ve COP'deki değişim gözlenmektedir. Nisan ayında COP değerinin yüksek elde edilmesindeki sebeplerden biri, ışınım değerinin ve PV/T yüzey alanının fazla olması nedeniyle evaporatör giriş sıcaklığını yükseltmesidir.



Şekil 7. Ocak (a) ve Nisan (b) aylarına ait hava kaynaklı çalışma modunda evaporatör sıcaklığı ve COP değişimi



Şekil 8. Ocak (a) ve Nisan (b) aylarına 6 m² PVT yüzey alanında evaporatör sıcaklığı ve COP değişimi



Şekil 9. Ocak (a) ve Nisan (b) aylarına 12 m² PVT yüzey alanında evaporatör sıcaklığı ve COP değişimi

Akıllı Şebeke Ortamına ait Bulgular

Dizayn edilen sistemin davranışını analiz etmek adına 6 farklı senaryo oluşturulmaktadır. Bu senaryolar farklı ayları ve sistem özelliklerini içermektedir. Senaryolar 15 dakikalık zaman aralıkları dikkate alınarak General Algebraic Modeling System (GAMS) programında test edilmektedir.

Senaryo 1: Ocak ayındaki bir günde hava kaynaklı ısıtma, değişken elektrik fiyatlandırması

Senaryo 2: Ocak ayındaki bir günde %15 PVT destekli ısıtma, değişken elektrik fiyatlandırması

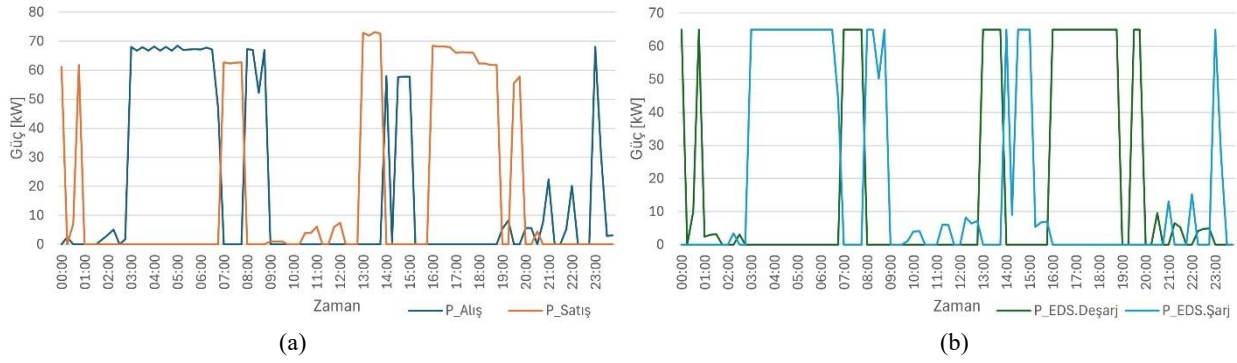
Senaryo 3: Ocak ayındaki bir günde %30 PVT destekli ısıtma, değişken elektrik fiyatlandırması

Senaryo 4: Ocak ayındaki bir günde %30 PVT destekli ısıtma, sabit elektrik fiyatlandırması

Senaryo 5: Nisan ayındaki bir günde %30 PVT destekli ısıtma, değişken elektrik fiyatlandırması

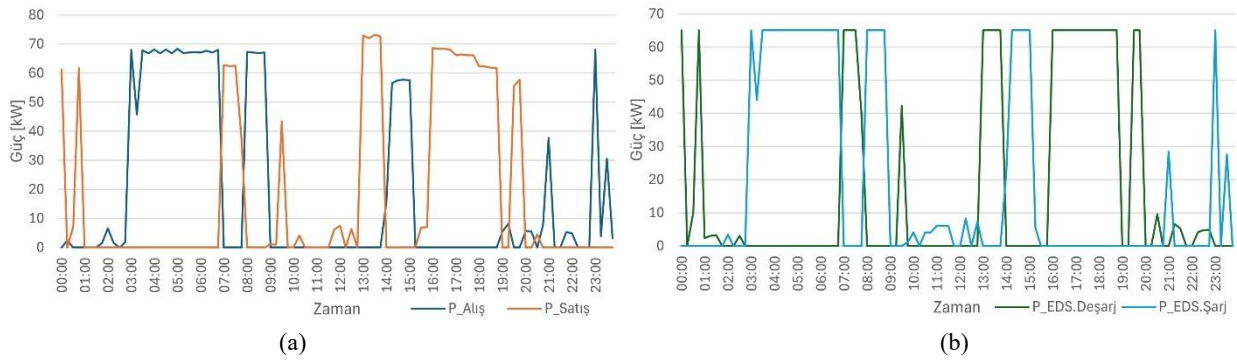
Senaryo 6: Nisan ayındaki bir günde %30 PVT destekli ısıtma, sabit elektrik fiyatlandırması

Senaryo 1’de evin yük talebi dışında ısıtma yükünün karşılanması amacıyla hava kaynaklı bir ısı pompası olduğu varsayılmaktadır. Isı pompasının sağladığı kazanç sayesinde daha az enerji harcarak istenilen ısıtma gerçekleştirilmektedir. Eve ait batarya sayesinde değişken elektrik fiyatlarından faydalanarak elektrik ve ısıtma talebi karşılanarak ek ekonomik fayda sağlanmaya çalışılmaktadır. Ocak ayındaki bir gün test periyodu olarak kabul edilmektedir. Test süresi boyunca şebeke ile ev arasında gerçekleşen enerji alışverişi ve EDS’ye ait şarj deşarj güç değerlerini gösteren grafikler sırasıyla Şekil 10 (a) ve Şekil 10 (b)’de gösterilmektedir.



Şekil 10. Senaryo 1’de şebeke ile ev arasındaki güç akışı (a) ve EDS’ye ait şarj ve deşarj güç değerleri (b)

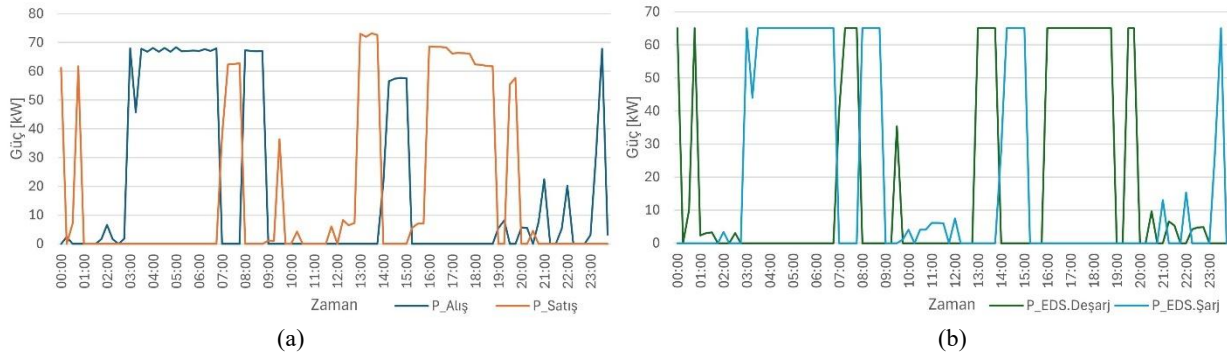
Sistemde yer alan PV bileşenleri yaklaşık olarak 40 m² alan kaplamaktadır. Senaryo 2’de ısı pompasını desteklemek amacıyla PV alanının %15’ine tekabül eden 6 m²’lik kısmının PVT olarak tasarlandığı düşünülmektedir. Güneş ışınımının olduğu saatlerde elektrik üretiminin yanı sıra ısı pompasının giriş suyu sıcaklığını artırmak amacıyla termal üretim gerçekleştirilmektedir. Bu durum ısı pompasının sağlaması gereken enerjiyi azalttığından harcanan elektrik enerjisinin azalmasına yardımcı olmaktadır. Ocak ayında seçilen bir gün için PVT desteği eklenen hali ile sistemdeki evin şebeke ile ilişkisini gösteren grafik Şekil 11 (a)’da, EDS’nin şarj ve deşarj operasyonlarına ait davranış Şekil 11 (b)’de gösterilmektedir.



Şekil 11. Senaryo 2’de şebeke ile ev arasındaki güç akışı (a) ve EDS’ye ait şarj ve deşarj güç değerleri (b)

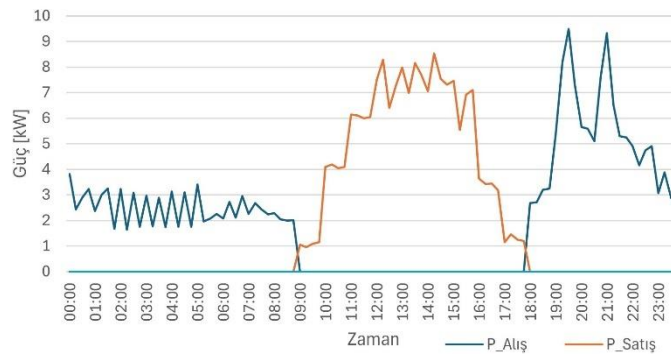
Senaryo 3’te Senaryo 2’deki durumdan farklı olarak PVT sisteminin boyutu 12 m²’ye yükseltilmektedir. Bu durumun etkisi ısı pompasına daha yüksek sıcaklıkta giriş suyu sağlanmasıdır. Böylece ısı pompasının harcamaya çalıştığı enerji bir miktar daha azalmaktadır. Senaryo 3’teki duruma göre evin enerji alış ve satışı Şekil 12 (a)’da, EDS’nin şarj ve deşarj gücüne ait değişim Şekil 12 (b)’de görülmektedir. Senaryo 1,2 ve 3’te gerçekleşen operasyonlar değişken elektrik fiyatlandırmasının bulunduğu piyasada gerçekleştiğinden enerji depolama ve enerjiyi şebekeye geri verme yöntemiyle ekonomik fayda amaçlanmaktadır. Bu yüzden Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12 birbirinden farklı grafikler olsa da aynı fiyat değişimi dikkate alındığından benzerlik göstermektedir. EDS’nin en büyük avantajı fiyatların ucuz olduğu zaman diliminde şarj edip pahalı olduğu zaman dilimlerinde deşarj ederek

gerçekleşmektedir. Tüm bu işlemler gerçekleştirilirken öncelikli olarak elektrik ve ısı ihtiyacının karşılanması da garanti edilmektedir.



Şekil 12. Senaryo 3'te şebeke ile ev arasındaki güç akışı (a) ve EDS'ye ait şarj ve deşarj güç değerleri (b)

Senaryo 4'te, Senaryo 3'te ifade edilen sistem bileşenlerinin boyutları ve kısıtlarında bir değişiklik olmazken, tüm operasyonların sabit elektrik fiyatı altında gerçekleştiği varsayılmaktadır. Daha önce Şekil 5 (b)'de verilen elektrik fiyat grafiğinin yaklaşık ortalama değeri olan 0,8 \$/kWh, tüm zaman aralıklarının elektrik fiyatı olarak kabul edilmektedir. Senaryo 4'te oluşturulan şartlar altında sistemdeki eve ait enerji alış ve satışını Şekil 13'te verilmektedir. Fiyatların sabit olması enerjinin depolanıp farklı zaman dilimlerinde satılmasının sağlayacağı faydaları ortadan kaldırmaktadır. Bu yüzden Senaryo 4'te herhangi bir EDS operasyonu gerçekleşmezken, ek ekonomik fayda sağlanmamaktadır. PV üretiminin ihtiyaçtan fazla olduğu zaman aralıklarında şebekeye satış, az olduğu zamanlarda ise şebekeden alış yapılmaktadır.

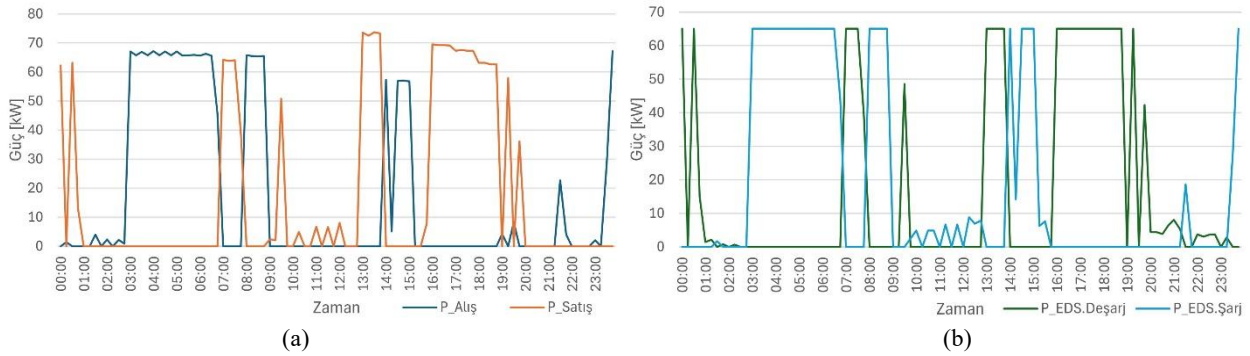


Şekil 13. Senaryo 4'te şebeke ile ev arasındaki güç akışı

Oluşturulan sistemin farklı bir aya ait sıcaklık ve ısıtım değerlerindeki davranışını test etmek adına Senaryo 5 ve Senaryo 6 oluşturulur. Her iki senaryoda da Nisan ayına ait daha önce Şekil 4 (a) ve Şekil 4 (b)'de paylaşılan meteorolojik ve elektrikselsel veriler kullanılır. Nisan ayında ısıtma yükünde azalma meydana geldiğinden ısı pompasının çalıştığı zaman dilimi azalmaktadır. Ayrıca tasarlanan evin iç sıcaklığının 19 °C olması istendiğinden, Nisan ayında özellikle öğle vakitlerinde dış ortam sıcaklığının 19 °C'den fazla olduğu durumlarda ısı pompasına ihtiyaç kalmamaktadır. Aynı zaman dilimleri ısıtımın yüksek olduğu zamanlara denk geldiğinden PV/T sisteminin termal özelliğinden faydalanılamamaktadır. Dolayısıyla hava kaynaklı ve farklı boyutlardaki PV/T sistemlerinin davranışı aynı olmaktadır. PV kısmında elektrik üretimine bakıldığında ise Nisan ayında ısıtımın Ocak ayına göre daha fazla olması, elektrik üretimine de artış olarak yansımaktadır.

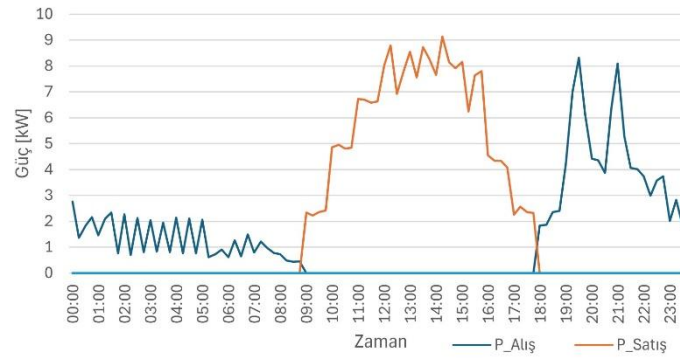
Senaryo 5'te sistemin 12 m² PV/T'ye sahip olduğu ve operasyonların değişken elektrik fiyatları ile gerçekleştiği varsayılmaktadır. Şekil 14 (a)'da eve ait enerji satın alımı ve satışına ait grafik

görüldürken, Şekil (b)'de EDS'nin etkin bir şekilde ekonomik fayda elde etmek adına şarj ve deşarj işlemleri yaptığı görülmektedir.



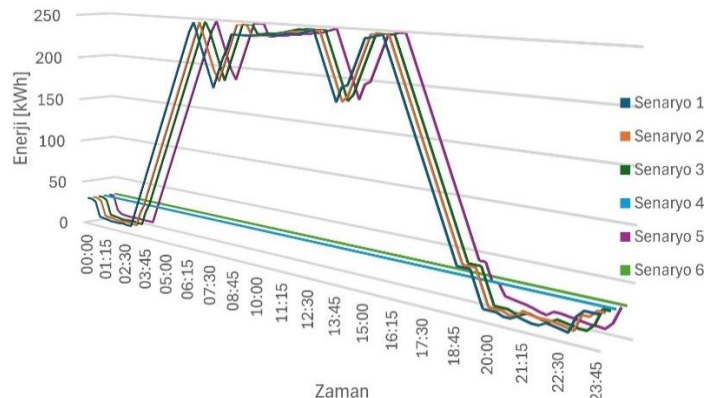
Şekil 14. Senaryo 5'te şebeke ile ev arasındaki güç akışı (a) ve EDS'ye ait şarj ve deşarj güç değerleri (b)

Senaryo 6'da Senaryo 5'ten farklı olarak tüm işlemler 0,8 \$/kWh elektrik fiyatı ile gerçekleşmektedir. Daha önce Senaryo 4'te de görüldüğü gibi EDS'nin fiyat değişiminden sağlayacağı avantaj ortadan kalktığından şarj ve deşarj işlemi gerçekleşmemekte, sadece PV üretimi ve yük talebine bağlı olarak alış ve satış olmaktadır. Sistemdeki evin güç akışı Şekil 15'te verilmektedir.



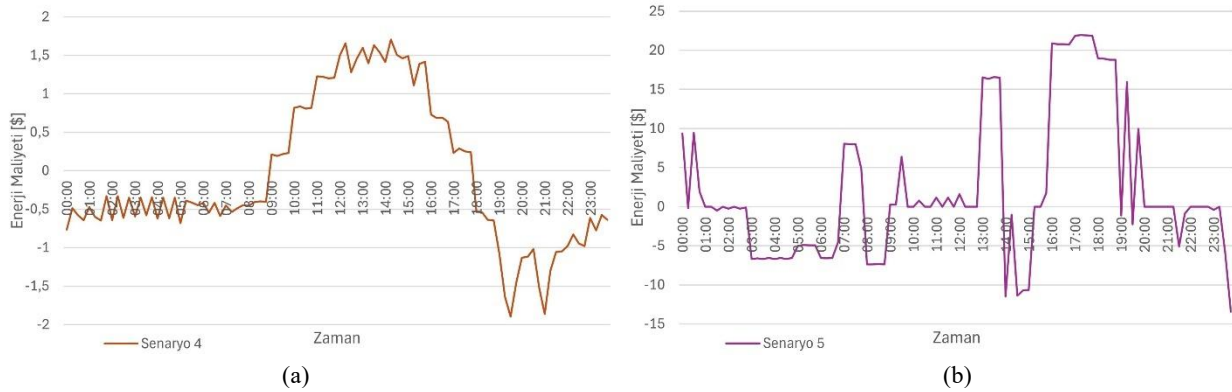
Şekil 15. Senaryo 6'te şebeke ile ev arasındaki güç akışı

Şekil 16'da verilen, tüm senaryolarda EDS'nin enerji değişim grafiği incelendiğinde fiyatın değişken olduğu senaryoların birbiri ile benzer olduğu görülmektedir. Aralarındaki ayırt edici küçük farklılıklar, PV sisteminin farklı ısıtım değerinde farklı değerde enerji üretmesi ile farklı aylardaki ısı talebine bağlı olarak ısı pompası gücünde meydana gelen değişimden kaynaklanmaktadır. Ayrıca elektrik fiyatının sabit olduğu Senaryo 4 ve Senaryo 6 analiz edildiğinde test süresi boyunca herhangi bir şarj deşarj işlemi olmadığından enerji değerinde değişim gözlenmemektedir. Hesaplamalarda senaryolar arasında haksız avantaj sağlamamak için EDS'nin başlangıçtaki ve sondaki ED değerinin aynı olması temin edilmektedir.



Şekil 16. Tüm senaryolara ait EDS'nin enerji değişimi

Senaryolarda ele alınan sistem boyutu ve ilgili güne ait ışınlım değerinin değişken olması sistemin ekonomik davranışı üzerinde etki üretmektedir. Ekonomik analiz esnasında her bir zaman diliminde gerçekleşen işlemler sonucunda oluşan durum kazanç veya harcama şeklinde hesaplanırken, test süresi sonunda toplam kazanç veya harcama ortaya çıkmaktadır. Birbirine benzer birden çok grafik ile karmaşıklık yaratmamak adına 2 farklı senaryoya ait kazanç harcama değişim grafiği Şekil 17 (a) ve Şekil 17 (b)'de gösterilmektedir. Senaryo 4'e ait olan grafik incelendiğinde PV üretiminin artmasıyla kazanç ve yük talebine bağlı olarak harcama artışı olduğu görülmektedir. Bu durumda EDS etkisi olmadan işlemler gerçekleşmektedir. Senaryo 5'in grafiğine bakıldığında enerji fiyatlarının değişiminden fayda sağlayan şekilde birçok işlem gerçekleştiği anlaşılmaktadır.



Şekil 17. Senaryo 4'te (a) ve Senaryo 5'te (b) her bir zaman aralığında gerçekleşen kazanç/harcama değişimi

Son olarak bir günlük test süresi boyunca her bir zaman aralığı için elde edilen kazanç/harcama değerleri üzerinden tüm senaryoların toplam enerji maliyeti hesaplamaları Şekil 18'de verilmektedir. Tasarlanan sistemdeki eve ait ısıtma ve elektrik üretim bileşenleri tüm senaryolarda yeterli seviyede ihtiyaçları karşılarken Senaryo 4 hariç diğer senaryolarda ekonomik fayda elde etmektedir. EDS'nin sunduğu esneklik sayesinde Senaryo 5'te ihtiyaçlar karşılandıktan sonra 198,55 \$ kazanç elde edilmektedir. Senaryo 4'te ise fiyatların sabit olması ve PV bileşeninin üretiminin ocak ayı olması nedeniyle düşük olması kazanç elde edilmesinin önüne geçse de ısıtma ve elektrik talebi karşılanmaktadır.



Şekil 18. Tüm senaryolara ait toplam enerji maliyeti

SONUÇ

Akıllı şebeke sistemi içerisinde özellikle rüzgar ve güneş enerjisi gibi küçük güçlü üretim sistemlerine tüketicinin erişebilir hale gelmesi şebekeyi dağıtık bir sistem haline gelmek için zorlamaktadır. Dahası, yönetmelik ve kanunlarla oluşturulan hukuki altyapı sayesinde bu süreç destek bulunmaktadır. Bu çalışmada, akıllı şebeke ekosisteminde yer alan PV elektrik üretim sistemi ile elektrik ihtiyacını, ısı pompası ile ısıtma ihtiyacını karşılamayı hedefleyen bir ev dikkate alınmaktadır. Ayrıca sahip olduğu EDS sayesinde değişken fiyatlardan faydalananarak kazanç elde etmeye çalışmaktadır.

Çalışmanın ilk aşaması olarak EES programında, tasarlanan evin ocak ve nisan aylarında seçilen günler için ısı ihtiyacı saptanarak evin özelliklerine uygun ısı pompası çevrimi gerçekleştirilmektedir. ESS programında hesaplar, hedeflenen evin sadece hava kaynaklı, 6 m² ve 12 m² PVT destekli ısı pompasına sahip olduğu 3 farklı durum ve ocak ve nisan aylarında seçilen 2 gün için yapılmaktadır. Hesaplamalar sadece hava kaynaklı çalışma şartlarında bile yüksek COP değerine ulaşıldığını ispatlarken, PVT desteği ile ısı pompası sisteminin elektrik enerjisi harcamasının azaldığı hesaplanmaktadır. Daha sonra, ısı ihtiyacını karşılama kapasitesine sahip ısı pompası sisteminin farklı saatlerdeki elektrik tüketim değeri hesaplanarak eve ait değişken anlık yük talebi hesaplanmaktadır.

İkinci aşamada akıllı şebeke ortamında enerji alış ve satış işlemleri analiz edilmektedir. Oluşturulan 6 farklı senaryo ile evin elektrik ve ısı talebi karşılanırken, ekonomik kazanç elde edilmesi amaçlanmaktadır. Değişken elektrik piyasasının uygulandığı Senaryo 1, 2, 3 ve 5'te dikkate değer kazanç elde edilmektedir. Tüm senaryolarda evin talepleri karşılanırken, en fazla ekonomik kazanç 198,55 \$ ile Senaryo 5'te elde edilmektedir. Senaryo 1, 2 ve 3'te elde edilen kazanç yaklaşık 182 \$ değerindeyken, Senaryo 5'te yaklaşık %9,6 artış gerçekleşmektedir. Nisan ayında PV üretiminin daha fazla ve ısıtma talebinin daha az olması en yüksek ekonomik kazancın elde edilmesinde en önemli rolü oynamaktadır.

Sonuç olarak, akıllı şebeke sisteminde yer alan tüketiciler zaman içerisinde gelişen hukuki ve teknik altyapı sayesinde sistem içerisinde aktif rol oynayarak hem ihtiyaçlarını karşılayıp hem de ekonomik avantajlar elde edebilir. Ayrıca, daha fazla yenilenebilir enerji kullanımı karbon salımının azaltmasına yardımcı olur. Gelecek çalışma olarak artan yenilenebilir enerji oranının emisyonlar açısından değerlendirmesi yapılarak çevresel etki hesaplamaları yapılırken, sistemlerin ilk yatırım maliyeti, amorti süresi gibi ekonomik analizler eklenebilir. Tasarlanan ısı pompasında kullanılan akışkanın çeşitlendirilerek ısıtma üzerindeki etkisi irdelenebilir. Ayrıca tek bir ev yerine evlerden oluşan bir tüketim bölgesi dikkate alınarak farklı ısıtma yöntemleri ile karşılaştırma yapılabilir. Diğer yandan, evlere ait araçların elektrikli araçlar olması durumunda sistemin yeterliliği araştırılabilir.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

KAYNAKLAR

- Abbas, S., Yuan, Y., Hassan, A., Zhou, J., Zeng, C., Yu, M., & Emmanuel, B. (2022). Experimental and numerical investigation on a solar direct-expansion heat pump system employing PV/T & solar thermal collector as evaporator. *Energy*, 254. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124312>
- Yakut, A., (2017). Yeni Nesil Soğutucu Akışkan R-32 Hakkındaki Son Gelişmeler ve Kigali Anlaşmasının Getirdikleri. Erişim adresi: <https://www.termodinamik.info/teknik/dr-andac-yakut-daikin-r32-sogutucu-akiskanlar> (Erişim adresi: 17 Şubat, 2025).
- Aktar, A. K. (2025). Energy transition in smart grids: Combining hydrogen, methanation and electric vehicles for sustainable heat and power. *International Journal of Hydrogen Energy*, 140, 787–802. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.05.363>
- Aktar, A. K., & Karakılıç, M. (2024). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Beslenen Bir Mikro Şebekenin Enerji Depolama Sistemleri Desteği ile Optimum Çalışması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 12(4), 1018–1034. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1533522>

- Behzadi, A., & Arabkoohsar, A. (2020). Feasibility study of a smart building energy system comprising solar PV/T panels and a heat storage unit. *Energy*, 210. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118528>
- Bilimsel, K., Teknolojik, /, Oturumları, A., Kirtepe, E., & Güngör, A. (2019). *İzmir koşullarında açık gökyüzü ışınlı için fotovoltaiik/termal (PV/T) kolektörün teorik modellenmesi*.
- Chandrasekar, M., & Senthilkumar, T. (2021). Five decades of evolution of solar photovoltaic thermal (PVT) technology – A critical insight on review articles. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 322). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128997>
- Duarte, W. M., Paulino, T. F., Pabon, J. J. G., Sawalha, S., & Machado, L. (2019). Refrigerants selection for a direct expansion solar assisted heat pump for domestic hot water. *Solar Energy*, 184, 527–538. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.027>
- Energy Agency, I. (2050). *Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector*. www.iea.org/t&c/
- Petrucchi, G. A., Peñaranda Chenche, L. E., Cardenas Gomez, A. O., Jaramillo Loayza, D. M., Belman Flores, J. M., & Garcia Pabon, J. J. (2024). Energy analysis of a direct expansion heat pump assisted by a thermal photovoltaic panel for hot water production in several regions of Brazil. *Energy Conversion and Management*, 319. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118969>
- Sezen, K., & Gungor, A. (2023). Comparison of solar assisted heat pump systems for heating residences: A review. In *Solar Energy* (Vol. 249, pp. 424–445). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.11.051>
- Singh, A. P., Tiwari, S., & Sinhar, H. (2025). A novel photovoltaic thermal and thermoelectric converter air collector integrated with solar dryer having thermal energy storage - An experimental approach. *Journal of Energy Storage*, 108. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.115115>
- Türk Standardları Enstitüsü (TSE), (2021). TS 825: Binalarda Isı Yalıtım Kuralları, Ankara.
- Zhang, L., Feng, G., Huang, K., Bi, Y., Chang, S., & Li, A. (2025). Design and optimization for photovoltaic heat pump system integrating thermal energy storage and battery energy storage. *Energy and Buildings*, 329. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115277>