

Orijinal Makale/Research Article

Trombe duvarı etkisiyle çalışan, binaya entegre yarı saydam fotovoltaiik sistemin akıllı uygulaması

Melik Ziya YAKUT¹, Raif ESEN²

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

²Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Güneş Enerjisi,
Aktif güneş enerjisi
Pasif güneş enerjisi
Trombe Duvarı
Yarı saydam güneş paneli
Akıllı sistem

Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 25.08.2021
Kabul Tarihi: 27.12.2021

Öz: Gelişen teknolojiler ve artan nüfusla birlikte hem elektrik, hem de ısıtma amaçlı kullanılan fosil yakıtlar küresel ısınmada en büyük faktör olan karbondioksit (CO₂) salınımı miktarlarını arttırmaktadır. Bazı binaların ısı yalıtımının iyi olmaması, elektrik iletim ve dağıtımdan kaynaklı kayıpların fazla olması konutlarda harcanan elektrik oranının yüksek kalmasını sağlamaktadır. Bu çalışma ile model odada Trombe duvarı etkisiyle çalışan yarı saydam-binaya entegre fotovoltaiik sistemin akıllı uygulaması ile, güneş enerjisini hem aktif hem de pasif olarak aynı anda kullanarak güneşten maksimum verim elde edilmesini sağlamaktadır. Bunun sonucunda binalarda hem ısı yalıtımını sağlarken hem de elektrik üretilmektedir. Yapılmış olan iki model odada Trombe duvarı etkisiyle çalışan yarı saydam fotovoltaiik sistemin 0.4°C hassasiyetli sıcaklık ölçerler ile Arduino mega 2560 kullanılarak veri toplayan kart imal edilerek hesaplanmıştır. Şubat-Mayıs ayı gibi güç bir dönemde yapılan ilk deneysel çalışmada güneş panelinin açısının dik olması ve yarı şeffaf hücre yapısının veriminin muadillerine göre daha düşük olmasıyla da ancak 14.93 kWh enerji üretilebilmiştir. Şubat ayında 100 kJ, Mart ayında 77,85 kJ, Nisan ayında 97.66 kJ, 1-10 Mayıs tarihleri arasında 49.93 kJ ve toplam 92 günde 325.44 kJ enerji tasarrufu sağlanmıştır. Böylece odalardan ayrı ayrı veriler toplanarak detaylı olarak farkları incelenmiş ve alternatif modelin neler sunabildiği görülmüştür.

Atıf için/To Cite:

Yakut, M.Z. Trombe duvarı etkisiyle çalışan, binaya entegre yarı saydam fotovoltaiik sistemin akıllı uygulaması. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 13(3), 121-129, 2021.

Intelligent application of building integrated semi-transparent photovoltaic system working with Trombe wall effect

Keywords

Solar Energy
Active solar energy
Passive solar energy
Trombe Wall
Semi transparent solar panel
Intelligent system

Article history:

Received: 25.08.2021
Accepted: 27.12.2021

Abstract: The emission of carbon dioxide (CO₂), which is the biggest factor in global warming, increases the use of both electricity production and heating with the developing technological innovations and increasing population. The poor thermal insulation of some buildings and the high losses due to electricity transmission and distribution ensure that the rate of electricity consumed in residences remains high. In this study, with the smart application of the translucent-building-integrated photovoltaic system working with the effect of the Trombe wall in the model rooms, it provides maximum efficiency from the sun by using the solar energy both actively and passively at the same time. As a result, it provides both thermal insulation and electricity generation in buildings. Two model rooms are prepared and the 0.4°C accuracy temperature sensor of the semi-transparent photovoltaic system working with the effect of the Trombe wall is prepared and the data collecting card is produced using Arduino mega 2560 and calculated. In the first experimental study carried out in a difficult period such as February to May, only 14.93 kWh of energy could be produced due to the steep angle of the solar panel and the lower efficiency of the semi-transparent cell structure than its counterparts. Data are collected separately from the two model rooms, and their differences are examined in detail and it is seen what alternative models could offer. Energy savings of 100 kJ in February, 77.85 kJ in March, 97.66 kJ in April and 49.93 kJ between 1-10 May and 325.44 kJ in total 92 days are

achieved. Thus, separate data are collected from the two model rooms and their differences are examined in detail and it is seen what alternative model could offer.

1. Giriş

Günümüzde, dünya enerji ihtiyacının büyük bir bölümünü karşılayan fosil yakıtlar, tüketimi hızla artmaktadır. Özellikle de gelişmiş ülkelerin fosil yakıt taleplerinin daha fazla olduğu görülmektedir. Buna karşın bu rezervler aynı ölçüde artmamaktadır. Enerjiye yönelik talep artmadan sabit kalsa bile, bu yakıt rezervlerinin sınırlı olması nedeniyle, çok da uzak olmayan bir gelecekte tükeneceği tahmin edilmektedir. Enerji ihtiyacının sürekli arttığı, ancak rezervlerin giderek azaldığı bir ortamda enerji kaynaklarının etkin bir şekilde kullanılması önem kazanmaktadır.

Geleneksel bir Trombe duvarı, güney cepheye bakan bir beton yüzeyli bir duvardır. Basit konfigürasyon, yüksek verimlilik, sıfır işletme maliyeti ve benzeri avantajlar nedeniyle son yıllarda yaygın olarak kullanılmış ve çok gelişmiştir. Bununla birlikte yaygınlaşmasını ve uygulamasını sınırlayan önemli etkenlerden biri de kararmış masif duvarın yarattığı estetik olmayan özelliğidir. Birçok teorik ve deneysel araştırma, Trombe duvarının ısı transferi, dinamiği ve performans analizine odaklanmıştır [1].

Bina sektörünün küresel enerji tüketimi, toplam CO₂ emisyonlarının yaklaşık %40'undan sorumlu olan yaklaşık %36'dır. Binalar ayrıca her yıl %2,5 büyüyen küresel elektriğin %55'inden fazlasını tüketiyor. Binalarda enerji tüketimi, enerji yönetimi şemaları kullanılarak azaltılabilir. Buna paralel olarak, enerji üretimindeki hızlı artış, kar örtülerinin erimesi, küresel ısınma, stratosferik ozon incelmeye, kuraklık ve çölleşme, kasırgalar ve tsunamiler vb. gibi olağanüstü iklim değişikliklerini tetikleyen kritik çevresel sorunlarla sonuçlanmıştır [2][10].

Pencere/cephe gibi binaya entegre yarı saydam fotovoltaik (STPV) sistem günümüzde giderek daha çekici hale gelmiştir. Bunun en önemli nedeni yarı saydamlığın getireceği aydınlık hissiyle, elde edilebilen elektrik enerjisi kazanımı ürünü çekici kılmasıdır. Ancak, pencerelerden kaynaklanan ısı kazancı veya ısı kaybı, binanın enerji tüketimini artıran zayıf ısı yalıtımı nedeniyle büyüktür. Bu sorunu çözmek için çeşitli gelişmiş enerji tasarruflu pencereler geliştirilmiştir. Gelişmiş pencerelerin bir türü olan PV pencereler, yarı saydam PV camları sıradan pencerelerle birleştiren hibrit sistemlerdir. PV camın yarı saydamlığı nedeniyle, pencereler ve iç duvarlar arasındaki parlaklık kontrastı küçüktür, bu da yumuşak ışık sağlayabilir ve parlama riskini azaltabilir. PV camın gölgeleme özelliklerinden dolayı güneş ısı kazancı da azalır. Bu nedenle, PV

pencereler sadece elektrik enerjisi üretmekle kalmaz, aynı zamanda görsel konforu artırır. STPV entegre pencere sistemi, doğrudan güneşin ısı veren dalga boylarını kullanır. Bu da ısı kazanımını ve kaybını doğrudan etkiler. Ayrıca STPV pencere sistemi için yüzey sıcaklığının en önemli faktörlerden biri olduğunu gözlemlemişlerdir. Yüzey sıcaklığı, bina sakinlerinin termal konforunu ve STPV modülünün enerji üretimini doğrudan etkiler. Ayrıca, STPV modülleri bir binada dış zarf olarak kullanıldığında, sistemin aşırı ısınma olasılığı yüksektir. Bu nedenle, STPV penceresinin tasarımında, pencerenin aşırı ısınmasını önleyen ve pencereden kritik ısı kaybı/kazanımını önlemeye yardımcı olan bazı stratejiler gereklidir [3][10].

L. Xu ve ark. (2021) çift hava kanalı ve faz değişim malzemesi ile entegre bir hibrit PV termal duvar sistemi tanıtmıştır [4]. Maghrabie ve ark. (2021), Wang ve ark. (2021) çalışmalarında binaya entegre fotovoltaik sistemin (BIPVT) ısıtma fonksiyonlusıyla çalışmışlardır. BIPVT sistemi, net sıfır emisyonlu binalar elde etmek için yenilikçi, pratik ve umut verici bir uygulama olarak önemlidir [2][13]. Kundakci Koyunbaba ve Yılmaz (2012) Trombe duvarında çift katmanlı cam panel ile akşamları daha iyi yalıtım sağlanarak çalıştırılmıştır. Ancak gündüzleri tek katmanlı cama göre daha az güneş radyasyonu elde edebileceği belirtilip ve gece boyunca tek katmanlı camın panjurlu kullanılmasını önermişlerdir [5]. Stazi ve ark. (2012) ise Trombe duvarı üzerinde kapsamlı bir çalışma yürüterek, çift katmanlı cam panelin, tek katmanlı bir cam panele kıyasla Trombe duvarında ısıtma performansı açısından önemli ölçüde iyileştirebilme sonucu göstermiştir [6]. Jie ve ark. (2007) DC fan destekli PV-Trombe duvarı (PV-TW) çalışmasını incelemişlerdir. Orijinal PV-TW modeline dayanarak hazırlanan tasarımla, DC fanlı ve fansız olarak PV-TW için teorik simülasyonlar yapılarak incelenmiştir. Aynı zamanda, modeli doğrulamak için bu iki vaka için saha testleri yapılmış ve daha sonra simüle edilmiştir. Sonuç olarak ısı artmasına katkı sunmuştur [7]. Ma ve ark. (2019) güneş sistemlerinin bina kabuğuna entegrasyonu, enerji verimliliğini arttırmaya katkıda bulunabilir. Ancak, bu sistemlerin ısı performansı için hesaplama metodolojilerinin olmaması, binalarda kullanımını etkilemektedir. Bir ofis binası için kompozit Trombe duvarının ısıtma potansiyeli, dinamik termal yük hesaplama yazılımı THERB for HAM kullanılarak tahmin edilmiştir [8]. Yine geliştirilmiş Trombe duvarının ısıtma özelliklerinin araştırılması üzerine sayısal bir çalışma yapılarak ve ticari bir yazılım ile CFD tarafından oluşturulan geliştirilmiştir. Trombe duvarının üç boyutlu modeline

dayalı olarak geliştirilmiş Trombe duvarı ile geleneksel bir Trombe duvarı arasındaki ısıtma özellikleri karşılaştırılmıştır Zhang ve ark. (2021) tarafından [9]. Başka bir çalışmada ise bu sefer fotovoltaik hücreler, CdTe hücreleri ile entegre edilmiş çift cidarlı havalandırılmalı bir pencere tasarlanmış ve test teçhizatı kırsal bir binada inşa edilmiştir. Önerilen pencerenin matematiksel modeli geliştirilmiş ve deneysel verilere göre doğrulanmıştır Wang ve ark. (2021) tarafından [10]. Isıtma uygulamalarında PV-Trombe duvarlı binalarda sağlanacak aylık enerjiyi belirlemek için SLR yöntemi kalibre edilerek aynı bina üzerine kurulmuş ancak farklı lokasyonlarda bulunan PV-Trombe duvarlarının gerçek koşullarındaki enerji performanslarının elde edilmesini sağlayan TRNSYS simülasyon programı kullanılmıştır Wang ve ark. (2022) tarafından [11]. Yine bir başka çalışmada Zhang ve ark. (2022) ısı üreten binaya entegre fotovoltaik pillerle çalışacak sistemin BIPV/T ve Yapay Zeka Ağı(ANN) kullanılarak ideal değerleri bulmaya çalışmışlardır [12].

Bu çalışma ile literatürde sıklıkla çalışan farklı farklı sistemlerin bir değişik korelasyonu sağlanarak daha idealleştirilmiş bir model ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. Bu tasarlanan sistemle birlikte özgün bir tasarımla yeni sistemin daha verimli çalışan bir model olması amaçlanmıştır. Bu amaçla Trombe duvarı etkisiyle yarı saydam güneş paneli ve bir kontrol mekanizması ile pek çok faydayı bir araya getirerek sürdürülebilir bir model sağlanmaya çalışılmıştır. Bu çalışma kapsamında güneş enerjisinden aktif ve pasif anlamda yararlanmanın incelenmesi amacı ile 2 farklı deney düzeneği kurulmuştur. Bu deney düzeneklerinden 6 Şubat 2021- 10 Mayıs 2021 tarihleri arasında veriler alınarak incelenmiştir.

2. Materyal Metod

Yapılmış olan deney düzeneği ile güneşten ise aktif ve pasif anlamda yararlanılmıştır. Bu çalışmada model bir odada Trombe etkili saydam güneş panelinin akıllı uygulaması incelenmiş olup bu doğrultuda analizleri yapılmıştır.

- Deney düzeneğinde eşit hacimlerde iki adet oda hazırlanmıştır.
- Oda içine güney cepheye bakan taraflarına bir adet (4+12+4) mm konfor ısı camlarla kaplı PVC pencere yerleştirilmiştir.
- PVC pencerenin ön kısmına boşluk bırakılarak yarı saydam güneş paneli yerleştirilmiştir.
- PVC pencerenin yan bölümünde 300 mm tuğla kalacak bir şekilde alçı levha ile etrafı kapatılmıştır.
- Yapılan çalışmada odalara eşit yükseklikte güneş görmeyen kısımlara ve dış hava

sıcaklığını ölçmek üzere sıcaklık sensörü koyulmuştur.

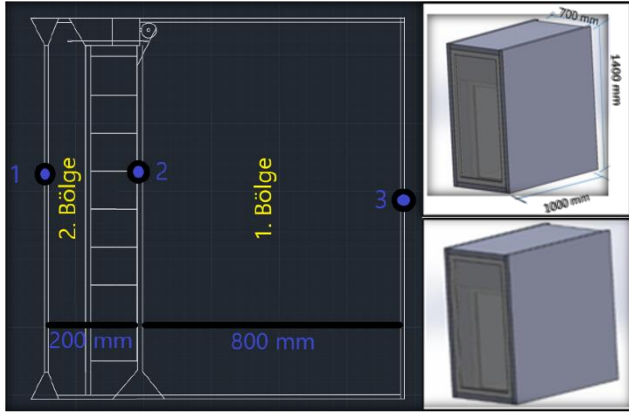
- Sıcaklığa bağlı deney düzeneği pencerenin açılıp kapanmasını sağlamaktadır.
 - Pencere sistemine eklenen aparat ile soğuk zamanlarda sistem içerisinde ısı kaybının engellenmesi, ısının ortamda tutulması ve tutulan ısının sıcaklık değişimi sonucu pencerenin otomatik olarak açılması ile ortama iletilmesi sağlanmıştır. Böylece odadaki ısı konforun korunması, yarı saydam güneş panelinin uygun çalışma sıcaklığında tutulması ile enerjinin daha verimli kullanılması sağlanmıştır.
- Sensör ile ilişki kurulması ve 1. odada daha önceden koyduğumuz step motorunu tetiklenmesi ve pencerenin açılıp kapanmasını sağlanması için Arduino mega 2560 kullanılmış ve yazılımı yapılmıştır.
 - Sıcaklık verilerin alınıp kaydedilmesi için Arduino mega 2560 ile uyumlu sd kart modülü kullanılmıştır.

Yarı saydam güneş panelinden günlük olarak üretilen elektrik aküde depolanması sağlanıp akım-gerilim ölçer sistemi ile üretilen enerjinin tespiti ve kayıtları tutulmuştur.

2.1. Deney Düzeneği Tanımlamaları

Eşit hacimlerdeki ve aynı konumdaki, deney düzenekleri güneş görmeyen uygun noktalara sıcaklık sensörleri bırakılmış olup, SD kart modülü ile anlık sistem içerisindeki sıcaklık verilerinin kaydı alınmıştır. Çalışma da Isparta ilinde 2021 yılında şubat, mart, nisan ve mayıs aylarının sıcaklık verilerini incelenmiş ve proje düzeneğinin bu aylardaki farklılık gösterilen grafikler araştırma ve bulgularda belirtilmiştir.

Şekil 1'de 1.odanın yarı saydam güneş panelinin arkasında kalan hacim, 1.oda 2. bölge olarak adlandırılmış ve Trombe etkisinin oluşumu izlenmiştir. 1.Odanın içerisi ise 1.bölge olarak adlandırılmıştır.



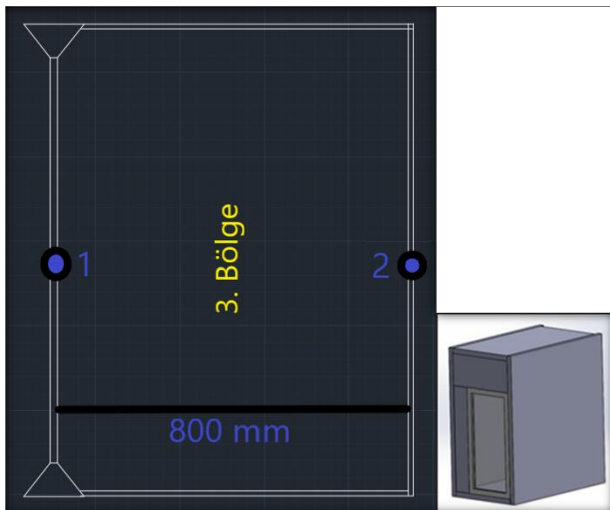
Şekil 1. 1.Odanın boyutları ve bölgeleri

Kullanılan yarı saydam güneş panelinin özellikleri Tablo1'de verilmiştir.

Tablo 1. Yarı saydam güneş pilinin özellikleri

Modül Tipi			ST1-72
Güç Çıkışı	$P_{çıkış}$	W	72
Voltaj= P_{mask}	V_{mask}	V	87
Akım= P_{mask}	I_{mask}	A	0,82
Açık devre voltajı	V_{OC}	V	116
Kısa devre akımı	I_{SC}	A	0,88
Panelin eni	1200 mm	Panelin boyu	600 mm
Panelin kalınlığı	6,8 mm	Panelin ağırlığı	11,8 Kg
Sıcaklık Katsayıları I_{sc}	$\alpha=0.060\%/^{\circ}C$	Hücre tipi	Cadmium Telluride(CdTe)
Sıcaklık Katsayıları V_{oc}	$\beta=-0.321\%/^{\circ}C$	Arka Cam	Temperli/Renkli/UV koorumalı/32 mm
Sıcaklık Katsayıları P_m	$\gamma=-0.214\%/^{\circ}C$	Kablo(uzunluk/kesit alanı)	700 mm /25 mm

2.Odada sadece PVC pencere ile oluştuğu için oluşan tek hacme 3.bölge adı konmuştur Şekil 2'deki gibi. Şekil 1 ve 2'deki numaralandırmalar tarif etme kolaylığı sağlanması için konulmuştur.



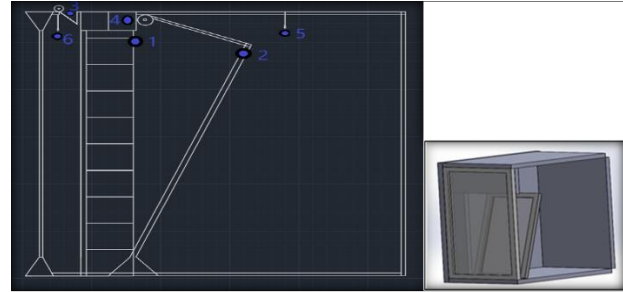
Şekil 2. 2.Odanın boyutları ve bölgesi

1.odadaki yarı saydam panelin hemen arka bölümünde tuğla ve PVC pencere bulunmaktadır. Buradaki tuğla ile ısı depolaması yapılabilmesi sağlanmaktadır Tablo 2'deki özelliklerde.

Tablo 2. Yatay delikli tuğlanın özellikleri

Boyut	19*19*13,5 cm	Isı iletkenlik değeri	0,32W/mK
Duvar Kalınlığı	19-13,5 cm	Basınç dayanımı	2 N/mm ²
Ağırlık	3 kg	Hacim Ağırlığı	600 kg/m ³

Şekil 3'te soğuk aylarda deney düzeneğinin 1.oda pencere açık pozisyonu gösterilmiştir.



Şekil 3. Soğuk günlerde 1.odanın penceresinin açılması

Şekil 3'teki PVC pencere, üst konumdan açılarak 1 numara ile gösterilen konumdan 2 numara ile gösterilen konuma açılacak özelliktedir. Konfor sıcaklığı olarak 22°C kabul edilmiş [14] ve kullanılan akıllı sistem 1. bölge sıcaklığının 22 °C düzeyinden daha düşük olduğu durumlarda 1. bölge ve 2. bölge sıcaklıklarını ölçerek 2. bölge sıcaklığının 1. bölge sıcaklığından 6 °C daha yüksek olduğu anda PVC pencerenin açılmasını, 2. bölgede bulunan hacimden 1. bölgede bulunan hacme ısı transferi gerçekleşmesiyle birlikte aradaki sıcaklık farkı 2 °C düzeyine indiğinde pencerenin kapanmasını sağlayacak şekilde programlanmıştır. Sistemin bu şekilde programlanmasının sebebi soğuk zamanlarda pencerenin kapalı kalmasını sağlayarak panel ve pencere arasında kalan alanın bir yalıtım bölgesi oluşturmasını ve taşınım kaynaklı ısı kayıplarının minimize edilmesini sağlamaktır. 1. bölge sıcaklığının 22 °C düzeyinden daha yüksek olduğu durumlarda Şekil 3'te, 3 numara ile gösterilen konumda bulunan kapaklar açılarak ısı birikiminin ve panel sıcaklığının daha fazla yükselmesini önlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca kullanılan yarı saydam güneş paneli sayesinde pencremizin soğuk hava akımı ile teması ilk aşamada engellenmiş olup, daha ılık bir hava akımı ile teması sağlanmıştır.

Sıcaklık ölçer olarak LM35DZ modeli sensör kullanılmıştır. Sensörün özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. LM35DZ sıcaklık sensörünün özellikleri

Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
-40°C / 110°C	0.4°C

1. bölgenin sıcaklığını ölçen sıcaklık sensörü Şekil 3'te 5 numara, 2. bölgenin sıcaklığını ölçen sıcaklık sensörü ise Şekil 3'teki 6 numara ile gösterilen kısımda konumlandırılmışlardır.

Model odalardan belirlenen periyotlarda sıcaklık ve elektrik üretimi değerlerinin ölçülüp kaydedilebilmesi için bir veri ölçüm sistemi tasarlanmıştır. Bunun yanında, ölçülen sıcaklık verilerine göre çalışan bir akıllı sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sistemi ve akıllı sistem tek bir kart üzerinden tek bir Arduino yazılım ile kontrol edilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Ölçümleri toplayıp, değerlendiren Arduino devresi

Sistemde PVC pencerenin açılmasını sağlamak amacıyla özellikleri Tablo 4'te verilen servo motor kullanılmıştır. Servo motor Şekil 3'te 4 numara ile gösterilen kısımda konumlandırılmıştır.

Tablo 4. Servo motor özellikleri

Bipolar (Seri)	4.94 VDC 2.12A
Bipolar (Paralel)	2.94 VDC 3.24A
Tutma Torku	3.2 Nm
Flanş Ölçüsü	60x60 mm
Nema	24
Boy	86 mm

2.2. Deney Düzenekinin Matematiksel Modeli

Kurulan sistemde ısı transferi geçişleri olup 1.Odada 2.bölgenin 0.20 m'lik derinliği olan ara boşluğunda ısınan hava, oda içerisine 0.98 m² alana sahip 1.bölgeye penceredeki mekanizma sayesinde gerektiğinde alınmakta ortamın ısısı artırılmaktadır. Sistemin enerji analizi açısından performansı belirleyecek hesaplama kriterleri ve modelleri aşağıdaki adımlar izlenerek bulunmuştur. Bu modeller oluşturulurken problem, düzensiz koşullar altında zamana bağlı olarak dikkate alınmıştır. Sistemin enerji analizi için aşağıdaki ifadelerden yararlanılmıştır [17]:

PV panelin enerji dengesi için önerilen denklem, PV hücrelerin ısı kapasitesi ihmal edildiğinde aşağıdaki gibidir.

$$\rho_G c_G \frac{\partial T_{pv}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X} \left(\lambda_G \frac{\partial T_{pv}}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial X} \left(\lambda_G \frac{\partial T_{pv}}{\partial Y} \right) + b \quad (1)$$

$$b = (S_C + S_P T_P) / D_G \quad (2)$$

$$S_C = [\alpha \tau + (1 - \tau)] I - E + h_{co} T_{dis} + \xi_1 h_{ro} T_{dis} + h_{ci} T_{ara} + \xi_2 h_{ri} T_{do} \quad (3)$$

$$S_P = -(h_{co} \xi_1 h_{ro} + h_{ci} + \xi_2 h_{ri}) \quad (4)$$

Pencere açık olduğunda hava kanalındaki enerji dengesi:

$$\begin{aligned} p D_a C_{hava} \frac{dT_{ara}}{dt} = & h_{ci} (T_{pv} - T_{ara}) \\ & + h_{do} (T_{do} - T_{ara}) \\ & - p V_a D_a C_{hava} \frac{dT_{ara}}{dX} \end{aligned} \quad (5)$$

Hava kanalındaki doğal taşınım olması durumundaki hava hareketi hızı aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır;

$$V_{ara} = \sqrt{\frac{0.5 g \beta (T_{alt} - T_{üst}) L}{C_f \left(\frac{L}{d} \right) + \left(\frac{C_{in} A_S^2}{A_{alt}^2} \right) + \left(\frac{C_{out} A_S^2}{A_{üst}^2} \right)}} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{2}{T_{alt} + T_{üst}} \quad (7)$$

$$A_S = w x D_{ara} \quad (8)$$

$$C_f = 0.3 x 1.368 Gr_x^{0.084} \quad (9)$$

İç hacimdeki ısı transferi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} \rho C_{hava} L_{oda} \left(\frac{dT_{oda}}{dt} \right) = & \frac{A_j}{D_{oda} L} U_j (T_j - T_{oda}) \\ & + h_{di} (T_{di} - T_r) - \frac{\dot{m} C_{hava} dT_r}{D_{oda} dX} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\dot{m} = p B_{ara} D_{ara} V_a \quad (11)$$

$$A_j = 2 B_{oda} L_{oda} + 2 L_{oda} L + 2 B_{oda} L \quad (12)$$

Güneş pilinin verimi aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır [15]:

$$\eta = \eta_r x [1 - 0.002 x (T_{PV} - T_r)] \quad (13)$$

Burada TPV güneş pillerinin ortalama sıcaklığı, T_r referans sıcaklığı (25°C), η_r modülün referans verimini ifade etmektedir. Güneş pilinin referans verimi ise aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

$$n_r = \frac{V_{mpp} \times I_{mpp}}{AxI} \quad (14)$$

PV/T sistemin günlük termal verimi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir [16]:

$$n_{th} = \frac{\sum m_{hava} \times C_{hava} \times (T_{üst} - T_{alt})}{Ax \sum I \times 3600} \quad (15)$$

PV/T sistemin ortalama termal verimi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir [16].

$$n_{oth} = \frac{n}{0,38} + n_{th} \quad (16)$$

Duvardan iç ortama konveksiyonla gerçekleşen saatlik ısı kazanç ve kayıpları aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$Q_{konveksiyon} = h_{di} \times A_{duvar} \times (T_{di} - T_i) \quad (17)$$

Duvardan iç ortama ısı ışınımla gerçekleşen saatlik ısı kazanç ve kayıpları aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$Q_{ışınım} = \varepsilon \times A_{duvar} \times \sigma \times T_{di}^4 - T_i^4 \quad (18)$$

Duvar ve iç ortam arasında gerçekleşen saatlik toplam ısı kazanç ve kayıpları aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$Q_{toplam} = Q_{konveksiyon} + Q_{ışınım} \quad (19)$$

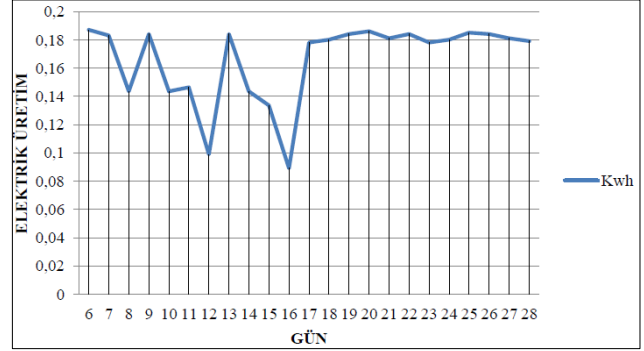
3. Bulgular

1.oda olarak tanımlanan model odada, Trombe duvarı etkisiyle çalışan yarı saydam- binaya entegre fotovoltaik sistemin akıllı uygulaması ile 2. oda olarak tanımladığımız PVC pencere sisteminin, Isparta ilinde 8 Şubat ve 10 Mayıs ayları arasında 2021 yılında hava şartlarına bağlı olarak sistem performansları izlemiştir.

Belirlenen tarihlerde saydam güneş panelinden 14.93 kWh enerji elde edilmiştir. Saydam güneş panelini 90° açı ile kullanılması ve hava şartları sebebi ile %9.9 olan verimi yaklaşık %4 de kadar düştüğü görülmüştür. Bu tarihler aralığında kurulmuş olan model odada Trombe

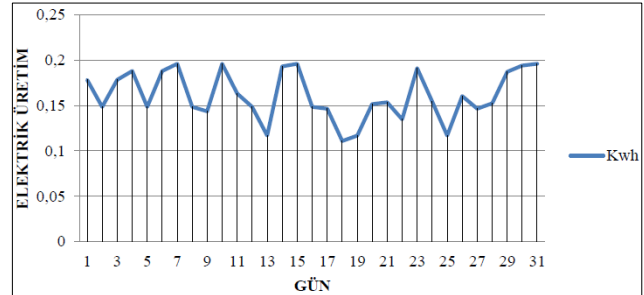
duvarı etkisiyle çalışan yarı saydam-binaya entegre fotovoltaik sistemin akıllı uygulaması ile 325.44 kJ değerinde enerji tasarrufu sağlanmıştır.

Şekil 5'te Şubat ayında deney sisteminde bulunan yarı saydam güneş panelinin günlük üretim değerleri verilmiştir. Bu verilere göre aylık toplam 3.81 kWh üretim olmuştur.



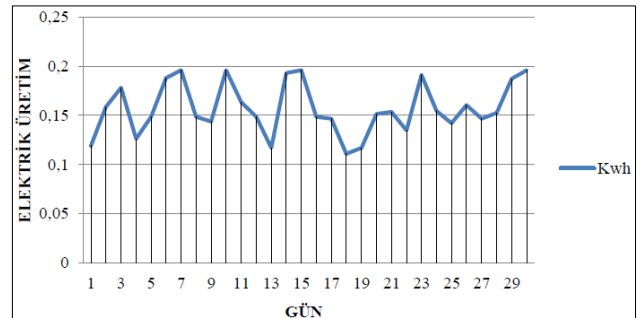
Şekil 5. Şubat ayında deney sisteminde bulunan yarı saydam güneş panelinin günlük üretim değerleri

Şekil 6'da Mart ayında deney sisteminde bulunan yarı saydam güneş panelinin günlük üretim değerleri verilmiştir. Bu verilere göre aylık toplam 4.99 kWh üretim olmuştur.



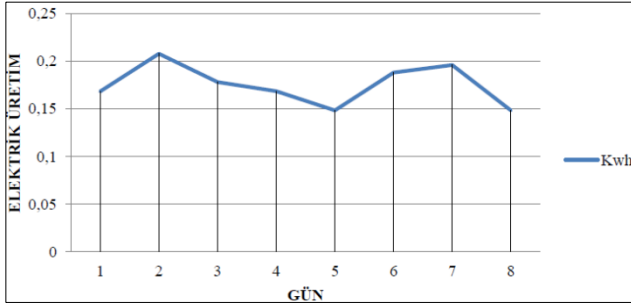
Şekil 6. Mart ayında deney sisteminde bulunan yarı saydam güneş panelinin günlük üretim değerleri

Şekil 7'de Nisan ayında deney sisteminde bulunan yarı saydam güneş panelinin günlük üretim değerleri verilmiştir



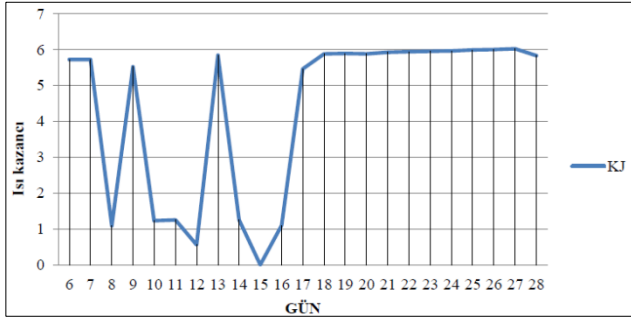
Şekil 7. Nisan ayında deney sisteminde bulunan yarı saydam güneş panelinin günlük üretim değerleri

Şekil 8’de Mayıs ayında deney sisteminde bulunan yarı saydam güneş panelinin günlük üretim değerleri verilmiştir. Bu verilere göre aylık toplam 1.4 kWh üretim olmuştur.



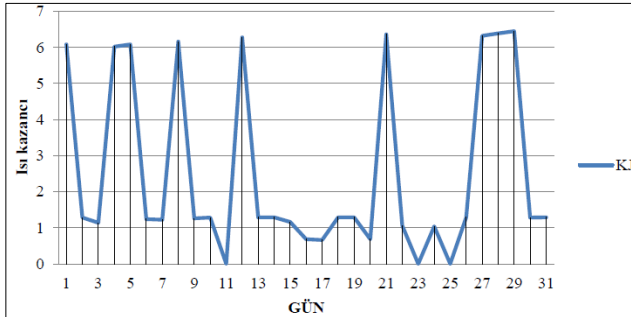
Şekil 8. Mayıs ayında deney sisteminde bulunan yarı saydam güneş panelinin günlük üretim değerleri

Şekil 9’da Şubat ayında deney sisteminde bulunan yarı saydam güneş panelinin günlük enerji kazanımları verilmiştir. Bu verilere göre aylık toplam 100 kJ enerji kazanımı olmuştur.



Şekil 9. Şubat ayında deney sisteminde bulunan yarı saydam güneş panelinin günlük tasarruf değerleri

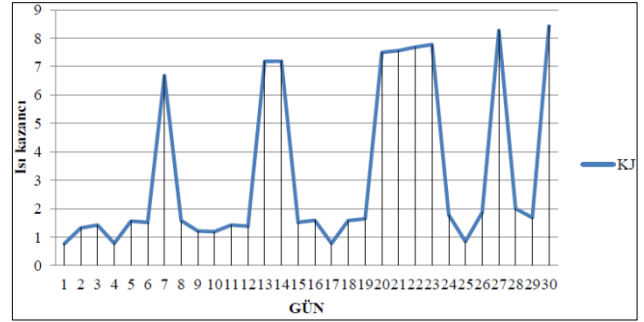
Şekil 10’da Mart ayında deney sisteminde bulunan yarı saydam güneş panelinin günlük enerji kazanımları verilmiştir. Bu verilere göre aylık toplam 77.85 kJ enerji kazanımı olmuştur.



Şekil 10. Mart ayında deney sisteminde bulunan yarı saydam güneş panelinin günlük tasarruf değerleri

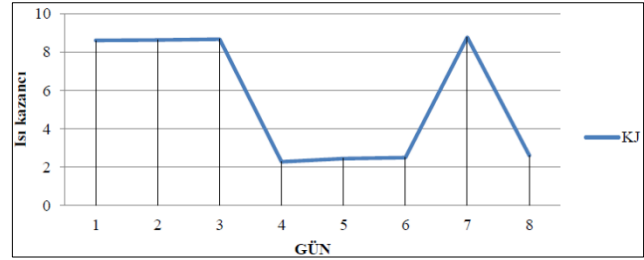
Şekil 11’de Nisan ayında deney sisteminde bulunan yarı saydam güneş panelinin günlük enerji kazanımları

verilmiştir. Bu verilere göre aylık toplam 97.66 kJ enerji kazanımı olmuştur.



Şekil 11. Nisan ayında deney sisteminde bulunan yarı saydam güneş panelinin günlük tasarruf değerleri

Şekil 12’de Mayıs ayında deney sisteminde bulunan yarı saydam güneş panelinin günlük enerji kazanımları verilmiştir. Bu verilere göre aylık toplam 49.93 kJ enerji kazanımı olmuştur.



Şekil 12. Mayıs ayında deney sisteminde bulunan yarı saydam güneş panelinin günlük tasarruf değerleri

4. Tartışma ve Sonuçlar

Bu çalışmada öncelikli olarak sistem içerisindeki odanın sıcaklık performansları incelenmiş sabit hacim ve yalıtımda olan odalardaki pencereli sistem ve yarı saydam güneş pilli Trombe duvarının bulunduğu aynı pencereli sistem bulunan iki oda ile karşılaştırılmıştır.

Yapılmış olan model odada Trombe duvarı etkisiyle çalışan yarı saydam fotovoltaik sistemin:

- Şubat ayında toplam 100 kJ,
 - Şubat ayında havanın açık olması diğer aylara göre Mart ve Nisan aylarına göre daha çok enerji tasarrufu sağlanmıştır.
- Mart ayında toplam 77,85 kJ,
- Nisan ayında toplam 97.66 kJ,
- 1-10 Mayıs tarihleri arasında 49.93 kJ
- Toplam 92 günde 325.44 kJ enerji tasarrufu sağlanmıştır.

Trombe duvar sistemlerinde ısı enerjisinin depolanması için Trombe duvarın güneş enerjisine maruz bırakılması gerekmektedir.

- Trombe duvar sisteminin, güneş battıktan sonra iç ortamın sıcaklığının daha geç düşmesini sağladığı yani depoladığı ısı enerjisi iç ortama aktardığı tespit edilmiştir.
- 3 farklı aydan havanın açık olduğu 3 farklı gün seçilerek 6 Mart, 6 Nisan ve 6 Mayıs tarihlerinde sistemlerden alınan veriler incelendiğinde, güneş battıktan sonra:
 - 6 Mart tarihinde 6.03 kJ enerji,
 - 6 Nisan tarihinde 7.24 kJ enerji,
 - 6 Mayıs tarihinde 8.65 kJ enerji,Trombe duvardan iç ortama aktardığı hesaplanmıştır.

Depolama değerleri arasında oluşan bu farkın güneşin geliş açısı sebebiyle ortaya çıktığı anlaşılmaktadır.

- Bu sebeple 3 aylık ölçüm periyodunda ürettiği enerji 14.93 kWh değerinde kalmıştır.

Sistem içerisinde öğlen saatlerinde Nisan ve Mayıs aylarında yarı saydam güneş panelinin sıcaklık değeri oldukça yüksek olması sebebiyle sıcak zamanlara göre ayarlanacak şekilde sistem çalıştırılmalıdır. Böylece yarı saydam güneş panelinden elde edilecek olan elektriksel verim daha fazla olacaktır. Bu nedenle ilerideki çalışmalarda bu konuya dikkat ederek sistem içerisindeki verimi artırmak yönünde hem elektriksel verim hem de sıcaklık anlamında en uygun ayarlaması yapılmalıdır.

Yarı saydam güneş paneli ve pencere arasındaki kalan 2.bölgenin genişliği ayrıca incelenmelidir. Yarı saydam güneş pilinin verimin artması için arka yüzeyinde oluşan sıcaklığın ve ısı kaybını kontrol edilmesi gereklidir. Bunun için hava akış hızı, ara boşluk mesafesi sonucu değiştirecektir. Bu sayede sistemden daha fazla verim elde edilebilir.

Farklı yalıtım ve boyutlardaki odalarda sistem performansına bakılmasıyla sistem performansı açısından daha verimli bir hale getirilebilir.

İklimlendirme koşullarına bakıldığında 22°C sıcaklığın konfor şartları için optimum sıcaklık olduğu belirlenmiştir. Bu şartlara bakıldığında 1. Oda 2.Bölge sıcaklığı 22°C'yi belirtilen tarihlerde zaman zaman aşmaktadır. Bu durum yeni nesil kendi enerjisini kendisi üreten akıllı ev sistemleri düşünülerek entegre bir akıllı iklimlendirme sistemi kullanılması gerekmektedir.

Kaynaklar

[1] J. Jie, Y. Hua, H. Wei, P. Gang, L. Jianping, and J. Bin, "Modeling of a novel Trombe wall with PV cells," *Build. Environ.*, vol. 42, no. 3, pp. 1544–1552, Mar. 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.01.005.

- [2] H. M. Maghrabie, K. Elsaid, E. T. Sayed, M. A. Abdelkareem, T. Wilberforce, and A. G. Olabi, "Building-integrated photovoltaic/thermal (BIPVT) systems: Applications and challenges," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 45, p. 101151, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101151.
- [3] S. Barman, A. Chowdhury, S. Mathur, and J. Mathur, "Energy performance of window integrated photovoltaic system in actual operating condition," *Sol. Energy*, vol. 224, pp. 480–490, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.06.014.
- [4] L. Xu *et al.*, "A hybrid PV thermal (water or air) wall system integrated with double air channel and phase change material: A continuous full-day seasonal experimental research," *Renew. Energy*, vol. 173, pp. 596–613, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.04.008.
- [5] B. Kundakci Koyunbaba and Z. Yilmaz, "The comparison of Trombe wall systems with single glass, double glass and PV panels," *Renew. Energy*, vol. 45, pp. 111–118, Sep. 2012, doi: 10.1016/J.RENENE.2012.02.026.
- [6] F. Stazi, A. Mastrucci, and C. Di Perna, "The behaviour of solar walls in residential buildings with different insulation levels: An experimental and numerical study," *Energy Build.*, vol. 47, pp. 217–229, Apr. 2012, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2011.11.039.
- [7] J. Jie, Y. Hua, P. Gang, J. Bin, and H. Wei, "Study of PV-Trombe wall assisted with DC fan," *Build. Environ.*, vol. 42, no. 10, pp. 3529–3539, Oct. 2007, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2006.10.038.
- [8] Q. Ma, H. Fukuda, X. Wei, and A. Hariyadi, "Optimizing energy performance of a ventilated composite Trombe wall in an office building," *Renew. Energy*, vol. 134, pp. 1285–1294, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.RENENE.2018.09.059.
- [9] L. Zhang, J. Dong, S. Sun, and Z. Chen, "Numerical simulation and sensitivity analysis on an improved Trombe wall," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 43, p. 100941, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.seta.2020.100941.
- [10] C. Wang, J. Ji, M. M. Uddin, B. Yu, and Z. Song, "The study of a double-skin ventilated window integrated with CdTe cells in a rural building," *Energy*, vol. 215, p. 119043, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.119043.
- [11] C. Wang, J. Ji, B. Yu, L. Xu, Q. Wang, and X. Tian, "Investigation on the operation strategy of a hybrid BIPV/T façade in plateau areas: An adaptive regulation method based on artificial neural network," *Energy*, vol. 239, p. 122055, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.122055.
- [12] C. Zhang, J. Ji, C. Wang, W. Ke, H. Xie, and B. Yu, "Experimental and numerical studies on the thermal and electrical performance of a CdTe ventilated window integrated with vacuum glazing," *Energy*, vol. 244, p. 123128, Apr. 2022, doi:

- 10.1016/j.energy.2022.123128.
- [13] C. Wang, J. Ji, C. Zhang, W. Ke, Y. Tang, and X. Tian, "Experimental and numerical investigation of a multi-functional photovoltaic/thermal wall: A practical application in the civil building," *Energy*, vol. 241, p. 122896, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.122896.
- [14] İnceten - Binalarda Isı Kayıplarının Dağılımı. <http://www.inceten.com/dokumanlar/binalarda-isi-kayıplarınındagilimi> (Erişim tarihi: 20.03.2019).
- [15] Skoplaki, E. & Palyvos, J.A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: a review of efficiency/power correlation. *Solar Energy Yayınları*, 2009.
- [16] Tiwari, A., Dubey, S., Sandhu, G.S., Sodha, M.S. & Anwar, S.I. Exergy analysis of integrated photovoltaic thermal solar Waterheaterunde constant flow rate and constant collection temperature modes. *Applied Energy*, 2009.
- [17] Ji Jie, Yi Hua, He Wei, Pei Gang, Lu Jianping, Jiang Bin, Modeling of a novel Trombe wall with PV cells, *Building and Environment*, 42(3), 1544-1552, 2007.

- A_j : Odanın güney cephesi hariç diğer cepheleri toplam alanı (m^2)
- U_j : Odanın güney cephesi hariç diğer cepheleri toplam alanlarındaki ısı transfer katsayısı (W/m^2K)
- η_r : PV modülünün referans verimini ifade etmektedir.
- P_{mpp} : Nominal güç
- V_{mpp} : Maksimum güç noktasındaki gerilim
- I_{mpp} : Maksimum güç noktasındaki akım
- A : Pilin yüzey alanı (m^2)

Ekler

Ek A. Kısaltmalar Dizini

- ρ_G : Panelin özgül ağırlığı (kg/m^3)
- c_G : Panelin özgül ısısı (kJ/kgK)
- T_{pv} : Panelin sıcaklığı
- λ_G : Isı iletkenlik katsayısı
- E : PV'nin ürettiği elektriksel güç oranı
- ξ : Yayma katsayısı
- α : PV yutuculuk katsayısı
- τ : Geçirgenlik katsayısı
- h_{co} : PV dış yüzeyindeki ışıma katsayısı (W/m^2K)
- h_{ro} : PV dış yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı (W/m^2K)
- h_{ci} : PV iç yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı (W/m^2K)
- h_{ri} : PV iç yüzeyindeki ışıma katsayısı
- T_{do} : Duvarın ara boşluğa bakan yüzeyinin sıcaklığı
- T_{ara} : Ara boşluk sıcaklığı
- T_{pv} : PV sıcaklığı
- V_a : Boşluktaki havanın hareket hızı
- D_a : Alt boşluk kalınlığı
- C_{hava} : Havanın özgül ısısı
- A_s : Hava kanalında havanın akışı yönüne dik doğrultudaki kesit alanı (m^2)
- C_{out} : Üst menfezdeki kayıp katsayısı (1)
- A_{alt} : Alt menfez açıklığının alanı (m^2)
- C_{in} : Alt menfezdeki kayıp katsayısı (1.5)
- A_{ust} : Üst menfez açıklığının alanı (m^2)
- G_{rx} : Grashof sayısı
- C_f : hava kanalındaki sürtünme faktörü
- \dot{m} : kütleli debi (kg/s)
- L_{oda} : Odanın derinliği (m)
- B_{oda} : Odanın genişliği (m)