

MİMARİDE TROMBE DUVARI UYGULAMASININ ENERJİ ANALİZİ

Erhan Kırtepe¹, Necdet Özbalta²

¹ Şırnak MYO, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri, Şırnak Üniversitesi, Şırnak, Türkiye, erhan.kirtepe@gmail.com, 0000-0002-1824-2599

² necdet.ozbalta1@gmail.com, 0009-0006-0710-2618

Özet

Bu çalışmada mimaride güneş enerjisinden pasif yararlanmayı olanaklı kılan Trombe duvarının ısı davranışı incelenmiştir. Trombe duvar tasarımı iki farklı akış modelinde, zorlanmış taşınımlı ve doğal taşınımlı olarak ele alınmıştır. Her iki durum için enerji denge denklemleri cam tabaka, hava kanalı ve ısı kütle dış yüzeyi için verilmiştir. Enerji denge denklemleri derlenerek denklem sistemi formunda yazılmış ve iteratif olarak çözülmüştür. Doğal taşınımlı ve zorlanmış taşınımlı Trombe duvarı kuruluşlarından odanın içine aktarılan toplam enerji miktarı sırası ile 2587,4 kJ/gün ve 2908,7 kJ/gün olarak hesaplanmıştır. Fan kullanımı ile odaya aktarılan enerjinin yaklaşık %12,4 oranında artış gösterdiği saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Enerji Analizi, Güneş Enerjisi, Isı Transferi, Trombe Duvarı.

ENERGY ANALYSIS OF THE TROMBE WALL APPLICATION IN ARCHITECTURE

Abstract

In this study, the thermal behavior of the Trombe wall, which enables passive use of solar energy in architecture, has been investigated. Trombe wall design is handled in two different flow models; forced convection and natural convection. The energy balance equations for both cases are written for the glass cover, air duct, and thermal mass outer surface. Energy balance equations were compiled and written in the form of a system of equations and then solved iteratively. The total amount of energy transferred into the room from the natural convection and forced convection Trombe walls has been calculated as 2587.4 kJ/day and 2908.7 kJ/day, respectively. It has been determined that the use of fans has increased the amount of energy that is transferred into the room by about %12,4.

Keywords: Energy Analysis, Solar Energy, Heat Transfer, Trombe Wall.

ARAŞTIRMA MAKALESİ / RESEARCH ARTICLE

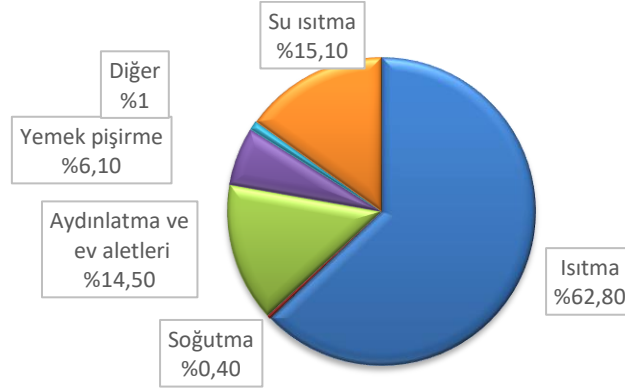
Geliş/Received: 10.04.2023 Kabul/Accepted: 24.06.2023

Kırtepe, E., ve Özbalta, N. (2023). Mimaride Trombe Duvarı Uygulamasının Enerji Analizi. *KARESİ Journal of Architecture*, 2(1): 46-60.

1. GİRİŞ

Enerji tüketiminin iklim ve çevre üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak amacı ile mimaride enerji etkin tasarım yaklaşımları önem kazanmaktadır. Enerjinin yapı sektöründeki etkisi, binaların inşası için malzeme temininden başlayarak, inşa eylemi, binanın kullanımı, yıkımı ve atıkların yönetimi süreçlerinde devam etmektedir. Günümüzde artan nüfus ve konfor gereksinimi yanında endüstrileşmeye bağlı olarak enerji talebi sürekli artmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre, konut, kamu ve ticari mülkleri içeren bina sektörü, 2020'de dünyadaki küresel enerjinin %30'unu tüketirken, konut binalarının CO₂ emisyonundaki payı %28 düzeyindedir (Abergel, T. ve Delmastro, C., 2020). Avrupa Birliği ülkelerinde ise atmosfere salınan karbon dioksit emisyonunun yaklaşık %36'ı bina sektöründen kaynaklanmaktadır (Guyot vd., 2019).

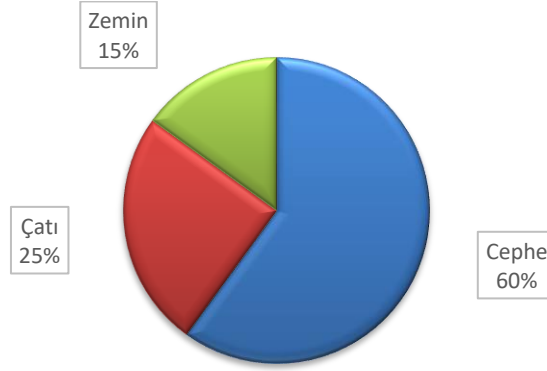
Dolayısı gerek çevrenin korunması gerekse ekolojik ve ekonomik açıdan binaların kullanımı sürecinde tüketilen enerjinin azaltılması kaçınılmazdır. Avrupa Birliği ülkelerinde 2020 yılında konutlarda tüketilen nihai enerjinin yaklaşık %62,80'i mekan ısıtmasına harcanmaktadır (Şekil 1). Su ısıtma, aydınlatma ve ev aletleri tarafından tüketilen enerji sırasıyla %15,10 ve %14,50 oranlarında dağılım göstermektedir (Eurostat, 2022). Ancak ülkelerin coğrafi konumuna bağlı olarak ısıtma ve soğutma yüklerinde farklılıklar söz konusudur.



Şekil 1. Konutlarda enerji tüketiminin dağılımı.

Türkiye'de nihai enerji tüketiminin sektörel dağılımı incelendiğinde meskenlerin payının %24,5 olduğu görülmektedir. Mekân ısıtma, mesken enerji tüketiminin yaklaşık %50-60'nı oluşturmaktadır. (ETKB, 2022).

Bina sektöründe tüketilen enerjinin büyük bir bölümü kışın ısıtmaya yazın ise iklimlendirmeye harcanmaktadır. Isıtma için enerjinin değerlendirilmesinde bina kabuğunun davranışı büyük önem taşımaktadır. Bina kabuğundan ısı kayıpları, cephe elemanlarından (dış duvar, kapı/pencere ve açıklıklar) % 60, çatıdan %25 ve zeminden %15 oranında gerçekleşmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. Bina kabuğundan çevreye ısı kayıplarının dağılımı (Yaman, 2021; Shoubi vd., 2015).

Enerji talebinin karşılanmasında ağırlıklı olarak rezervleri gittikçe azalan fosil kökenli enerji kaynaklarının kullanılması çevresel sorunları da beraberinde getirmektedir. Binalarda ısıtma amaçlı enerji tüketimini azaltmak için geliştirilen önlemler arasında yenilenebilir enerji kaynaklarının özellikle güneş enerjisinin kullanımı her geçen gün önem kazanmaktadır. Güneş enerjisinden mimaride mekan ısıtması, sıcak su eldesi ve elektrik enerjisi üretimi amacı ile yararlanmak olanaklıdır. Mekan ısıtma amaçlı güneş enerjisi sistemlerinde gerçekleştirilen üç işlev: güneş enerjisinin toplanması, depolanması ve depolanan enerjinin mekana aktarılması şeklinde sıralanır. Güneş enerjisi ile mekanların ısıtılması aktif ve pasif yöntemlerle sağlanır. Aktif ısıtma sistemlerinde depolanan enerjinin aktarılması için fan veya pompaya gerek duyulmaktadır. Pasif ısıtma sistemlerinde ise depolanan enerjinin aktarılması ise ısı transfer mekanizmaları (iletim, taşınım, ışıyım) ile gerçekleştirilir. Güneş enerjisi ile mekanların pasif ısıtma teknikleri direkt kazanç (pencereler) ve dolaylı kazanç (kış bahçesi, Trombe duvarı) uygulamaları olarak adlandırılır.

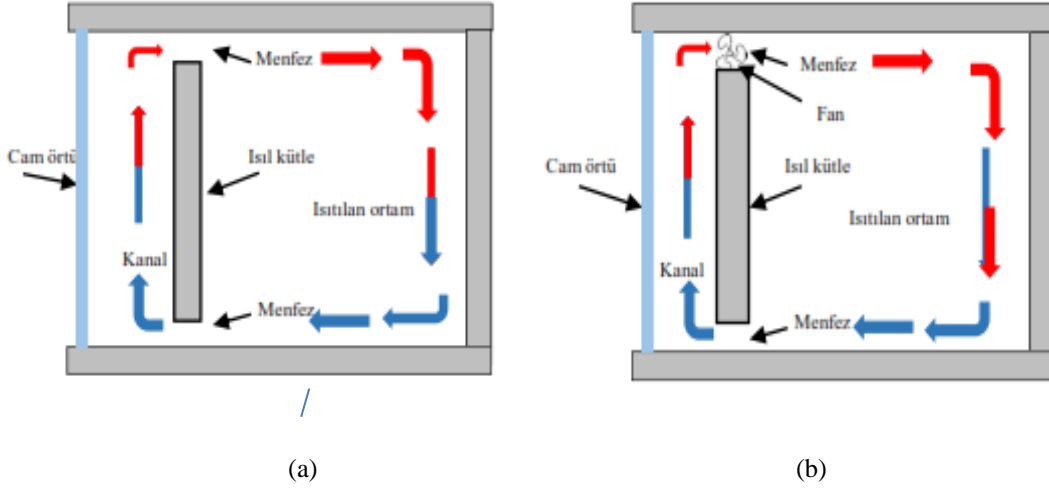
Abdeen vd. (2019) çalışmalarında optimum Trombe duvarı yüksekliğinin 1,7 m, kanal derinliğinin 0,22 m ve ısıtma kalınlığının 0,3 m olması durumunda tipik kış koşullarında ısıtma konforunun %38,19 oranında iyileştiğini belirtmiştir (Abdeen vd., 2019). Şili'nin farklı iklim (sahil ve iç bölge) koşullarında prefabrike Trombe duvarı uygulaması ile ısıtma enerjisi tasarrufu %44,14 ve %25,35 olarak elde edilmiştir (Agurto vd., 2020). Bevilacqua vd. (2019) ise Trombe duvarı performansını soğuk iklim koşulunda %18,2, ılıman iklim koşulunda ise %71,7 olarak saptamıştır (Bevilacqua vd., 2019). Fransa Lyon'da ısıtma döneminde Trombe duvarı ile %20 enerji tasarrufu sağlandığı belirtilmiştir (Bojic vd., 2014). Charqui vd. (2023) çalışmalarında üç farklı (tek camlı betonarme, çift camlı betonarme, çift camlı su duvarlı) havalandırmasız Trombe duvarının matematiksel modelini oluşturarak ısıtma davranışını incelemişlerdir. Çift camlı su duvarlı tasarımın %46 ısıtma verim ile en iyi performansı sergilediğini, gelen güneş ışınımı ile iç yüzeydeki ısı akışı arasında zaman gecikmesini kış aylarında 4 saat 49 dakika, yaz aylarında ise 7 saat 23 dakika olarak elde etmişlerdir (Charqui vd., 2023). Yılmaz vd. (2018) Edirne iklim koşullarında Trombe duvarının performansını analitik olarak

incelemiştir. Anılan çalışmada farklı ısı kütlesi (betonarme, tuğla, hafif beton) malzemesi ve kalınlığı, ısı kütlesi ile cam tabaka aralığı, Trombe duvarı boyutunun ısı performansına etkisi incelenmiş ve en uygun tasarımı araştırmışlardır. Ayrıca Trombe duvarında saydam yalıtım malzemesinin kullanımının avantajları da incelenmiştir (Yılmaz vd., 2018). Jaber ve Ajib (2011) Ürdün iklim koşullarında (ısı kütlesi yüzey alanı/toplam güney duvarı yüzey alanı) oranının bina ısıtılmasına olan etkisini **yaşam döngüsü maliyet analizi** yöntemini kullanarak ekonomik açıdan incelemiştirlerdir. Optimum yüzey alanları oranı %37 ve yardımcı ısıtma enerjisindeki tasarruf oranı da %32,1 olarak bulunmuştur (Jaber ve Ajib, 2011).

2. TROMBE DUVARI

Trombe duvarının temel elemanlarını ısı kütlesi, hava kanalı ve cam tabaka oluşturur. Sistemin etkinliğini artırmak amacı ile ısı kütlelerinin alt ve üst kısmında menfezler tasarlanır; ayrıca bazı uygulamalarda aşırı ısınma sorununun önüne geçmek için gölge elemanından (özellikle ılıman iklim bölgelerinde) yararlanır. Bilindiği üzere yeryüzüne gelen güneş ışınımı 0,3-3,0 µm dalga boyu aralığında olup kısa dalga boyludur. Güneş enerjisini depolamak için ısı kütlesi olarak betonarme, tuğla malzemesi kullanılabileceği gibi su duvarı ya da faz değiştiren malzemelerin de kullanımı olanaklıdır. Trombe duvarı kuruluşundaki cam katmanı kısa dalga boylu ışınımı büyük oranda geçirir ve böylece sistem yüzeyine gelen güneş enerjisi engellenmeden ısı kütlelerinin dış yüzeyine ulaşır ve yutulur. Isı kütlesi dış yüzeyinde güneş enerjisini yutma özelliği olan yüksek koyu renkler tercih edilir. Isı kütlede yutulan güneş enerjisinin bir kısmı iletim, taşınım ve ışınım ile iç mekana aktarılır, bir kısmı ise taşınım ile kanal içindeki havaya transfer edilir. Ayrıca cam tabaka ile ısı kütlesi arasında ışınım yolu ile de ısı geçişi gerçekleşir. Akış kanalındaki hava, cam tabaka ve ısı kütlelerinin dış yüzeyi ile sınırlıdır ve bu yüzeylerden havaya taşınım ile ısı geçişi olur (Hu vd., 2017).

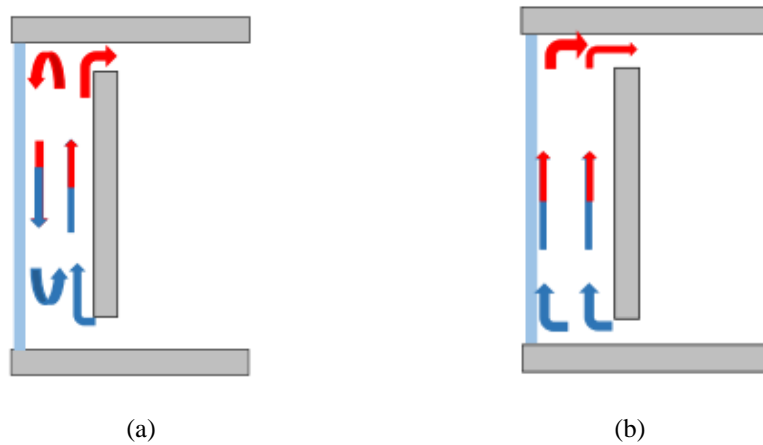
Havalandırılmalı Trombe duvarı uygulamasında, hava akış kanalı ile ısıtılan mekan arasındaki hava hareketi ısı kütlelerinin alt ve üst kısmında yer alan menfezler ile sağlanır (İbrahim vd., 2023). Isı kütlelerinin sıcaklığının artması ile akış kanalındaki hava yükselir ve üst menfezden iç mekana giriş yapar (Şekil 3a); ancak Trombe duvarı uygulamasında performansı arttırmak için kanal içindeki havanın hareketi, güneş enerjisi tahrikli fan kullanılarak sağlanabilir (Şekil 3b). Cam tabaka ve ısı kütlelerinden akış kanalındaki havaya ısı geçişi zorlanmış taşınım yoluyla gerçekleşir (Abdullah vd., 2022; Jie vd., 2007).



Şekil 3. Trombe duvarı a) Doğal taşınımı, b) Zorlanmış taşınımı.

Havalandırılmalı Trombe duvarında akış kanalındaki havanın hareketi, dış hava sıcaklığı ve güneş ışınımı yoğunluğundan etkilenir (Piotrowski vd., 2013; Olenets vd., 2015). Dış ortam sıcaklığının düşük, ancak güneş ışınımı yoğunluğunun yeterli olduğu durumlarda cam örtü sıcaklığı, ısıtılan mekan sıcaklığından daha düşük ise cama yakın hava soğur ve aşağı yönde hareket eder (Şekil 4a). Buna karşın sıcaklığı yüksek olan ısıl kütleyle yakın hava ise ısındığı için yukarı doğru hareket eder ve mekan içine yönelir. Bu durumda toplam kütle hareket yukarı daha etkindir. Ancak düşük dış ortam sıcaklığı ve yetersiz güneş ışınım yoğunluğu durumunda ise cam örtü yüzeyine yakın bölgede soğuyan hava akımı, ısıl kütle yakınında ısınan hava akımından daha fazla etkin olacağı için sistem performansında önemli düşüş görülür (Piotrowski vd., 2013; Olenets, vd., 2015).

Buna karşın cam örtü sıcaklığının mekan sıcaklığından daha yüksek olduğu durumda ise kanal içindeki hava hareketi ısıl kütle yüzeyindeki gibi yukarı doğru gerçekleşir (Şekil 4b). Cam örtü ve ısıl kütlelerden akış kanalındaki havaya ısı geçişi doğal taşınım yoluyla gerçekleşir.



Şekil 4. Trombe duvarı akış kanalında hava hareketi. a) Cama yakın havanın soğuması ve aşağı doğru hareketi, b) Cama yakın havanın ısınması ve yukarı doğru hareketi.

Bu çalışmada havalandırılmalı Trombe duvarının (doğal taşınım ve zorlanmış taşınım) ısı performansı incelenmiştir.

3. MATEMATİKSEL MODEL

Matematiksel modelin kurulmasında ve denklemlerin çözümlenmesinde aşağıdaki varsayımlar yapılarak Trombe duvarı sistem elemanlarının enerji dengeleri yazılmıştır (Dimassi ve Dehmani, 2016; Abdeen vd., 2019; Rabani, 2022; Duan vd., 2016; Mokni vd., 2022; Sa vd., 2017; Yılmaz vd., 2018):

- Tüm sistem sürekli rejim koşullarında çalışmaktadır.
- Cam tabaka ve ısı küttele ısı geçişi bir boyutlu olup, hava akışına dik doğrultuda meydana gelmektedir.
- Cam tabaka sıcaklığı üniformdur.
- Cam tabaka ve ısı kütlenin ısı kapasiteleri ihmal edilmiştir.
- Yan duvarların ısı kaybı, etkilerinin küçük olması nedeniyle ihmal edilmiştir.
- Akış kanalından geçen hava mükemmel gazdır.
- Akış kanalı girişindeki hava sıcaklığı, iç mekan sıcaklığına eşittir.
- Hava akış kanalı kesit alanı sabittir.
- Tüm termofiziksel özellikler ortalama sıcaklıkta alınmıştır.
- Mekan sıcaklığı üniformdur.

1.1. Cam Tabaka İçin Enerji Dengesi

Cam tabaka ile ısı küttele dış yüzeyi, akış kanalındaki hava ve çevre arasında enerji dengesi aşağıdaki verilmiştir.

$$\left[\begin{array}{c} \text{Cam tabakada} \\ \text{yutulan} \\ \text{güneş ışınımı} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Isıl kütle ve cam tabaka} \\ \text{arasında ışınlama} \\ \text{ısı geçişi} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Cam tabaka ve akış} \\ \text{kanalındaki hava} \\ \text{arasında} \\ \text{taşınım ile ısı geçişi} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Cam tabaka ve çevre} \\ \text{arasında} \\ \text{ışınım ve taşınım ile} \\ \text{ısı geçişi} \end{array} \right]$$

$$\alpha_g A_g I_T + h_{r,w-g} A_w (T_w - T_g) = h_{c,g-f} A_g (T_g - T_f) + \sum q_L \quad (1)$$

Cam tabakadan çevreye ışınlım ve taşınım ile gerçekleşen ısı geçişi Eşitlik 2'den elde edilir.

$$\sum q_L = U_t A_g (T_g - T_a) \quad (2)$$

Burada U_t , toplam ısı geçiş katsayısıdır ve dış ortamdaki rüzgar hızı, gök ve çevre sıcaklığına bağlı olarak hesaplanır.

$$U_t = h_w + h_{r,g-s} \quad (3)$$

3.2 Akış Kanalından Geçen Hava İçin Enerji Dengesi

Benzer şekilde cam tabaka ve ısı kütlesi arasındaki akış kanalından geçen çalışma akışkanını hava için enerji dengesi aşağıdaki bağıntıdan elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \text{Isıl kütle ve akış} \\ \text{kanalındaki hava} \\ \text{arasında} \\ \text{taşıyım ile ısı geçişi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Cam tabaka ve akış} \\ \text{kanalındaki hava} \\ \text{arasında} \\ \text{taşıyım ile ısı geçişi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Akış kanalından} \\ \text{geçen havaya} \\ \text{aktarılan enerji} \end{bmatrix}$$

$$h_{c,w-f}A_w(T_w - T_f) + h_{c,g-f}A_g(T_g - T_f) = q_{conv} \quad (4)$$

Akış kanalından geçen çalışma akışkanını havaya taşıyım ile ısı geçişi, cam tabaka ve ısı kütlesi sıcaklıklarının, tüm sistemde sabit olduğu kabul edilerek aşağıdaki eşitlikten hesaplanır.

$$q_{conv} = \dot{m}C_f(T_{f,o} - T_{f,i}) \quad (5)$$

Akış kanalından geçen havanın ortalama sıcaklığı, ortalama sıcaklık yaklaşım katsayısı $\gamma=0,74$ alınarak aşağıdaki eşitlikten hesaplanır (Duan vd., 2016).

$$T_f = \gamma T_{f,o} + (1 - \gamma)T_{f,i} \quad (6)$$

Trombe duvarından mekan içine taşıyım yoluyla ısı geçişi, havanın kanala giriş sıcaklığı oda sıcaklığına eşit alınarak elde edilir.

$$q_{conv} = \dot{m}C_{f1}(T_f - T_r)/\gamma \quad (7)$$

Akışkan hareketinin doğal taşıyım ile sağlandığı Trombe (fansız) duvarında akış kanalından geçen hava kütle debisi eşitlik 8 ile hesaplanır.

$$\dot{m} = C_d \rho_{f1} A_o \sqrt{\frac{2 g L (T_f - T_r)}{(1 + A_r^2) T_r}} \quad (8)$$

Burada $A_r = A_o/A_i$, A_o ve A_i akış kanalı çıkış ve giriş alanlarıdır (Abed vd., 2021; Jie vd., 2007; Abdullah vd., 2022).

Zorlanmış taşıyımlı Trombe duvarında cam tabaka ve ısı kütlesi arasındaki akış kanalında havanın hareketi, kanal çıkışına yerleştirilen fan yardımıyla sağlanır. Fan güneş enerjisi ile çalıştırılır. Dolayısıyla hava hızı, güneş ışınımına bağlı olarak değişir.

$$V = C_{fan} G \quad (9)$$

Burada V (m/s) kanaldan geçen hava hızı, G (W/m^2) güneş ışınımı, $C_{fan}=0,0006$ m^3/J fan sabitidir (Ahmed vd., 2019; Abed vd., 2021).

3.3 Isıl Kütle İçin Enerji Dengesi

Isıl kütle ile cam tabaka, akış kanalındaki hava ve iç mekan arasındaki enerji dengesi aşağıdaki bağıntıdan elde edilir.

$$\left[\begin{array}{c} \text{Isıl kütle ve akış} \\ \text{kanalındaki hava} \\ \text{arasında} \\ \text{taşınımla ısı geçişi} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Isıl kütle ve cam tabaka} \\ \text{arasında ışınlama} \\ \text{ısı geçişi} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Isıl kütle ve dış} \\ \text{yüzeyinden odaya} \\ \text{iletim ve taşınımla} \\ \text{ısı geçişi} \end{array} \right]$$

$$(\tau\alpha)I_T A_w = h_{c,w-f} A_w (T_w - T_f) + h_{r,w-g} A_w (T_w - T_g) + q_{cond} \quad (10)$$

$$q_{cond} = U_b A_w (T_w - T_r) \quad (11)$$

Burada U_b ısı kütle ile oda arasında toplam ısı geçiş katsayısıdır.

$$U_b = [(1/h) + (L_w/k_w)]^{-1} \quad (12)$$

Enerji denge denklemleri derlenerek aşağıda gösterildiği gibi denklem sistemi formunda yazılabilir.

$$a_{11} T_g + a_{12} T_f + a_{13} T_w = C_1 \quad (13a)$$

$$a_{21} T_g + a_{22} T_f + a_{23} T_w = C_2 \quad (13b)$$

$$a_{31} T_g + a_{32} T_f + a_{33} T_w = C_3 \quad (13c)$$

Yukarıdaki denklem sistemindeki katsayılar aşağıda yazıldığı gibi tanımlanır:

$$a_{11} = h_{r,w-g} A_w + h_{c,g-f} A_g + U_t A_g, \quad a_{12} = -h_{c,g-f} A_g, \quad a_{13} = -h_{r,w-g} A_w, \quad C_1 = \alpha_g I_T A_g + U_t A_g T_a$$

$$a_{21} = h_{c,g-f} A_g, \quad a_{22} = -\left(h_{c,w-f} A_w + h_{c,g-f} A_g + \frac{m c_{f1}}{\gamma}\right), \quad a_{23} = h_{c,w-f} A_w, \quad C_2 = -\frac{m c_{f1}}{\gamma} T_r$$

$$a_{31} = -h_{r,w-g} A_w, \quad a_{32} = -h_{c,w-f} A_w, \quad a_{33} = h_{c,w-f} A_w + h_{r,w-g} A_w + U_b A_w, \quad C_3 = (\tau\alpha) I_T A_w + U_b A_w T_r$$

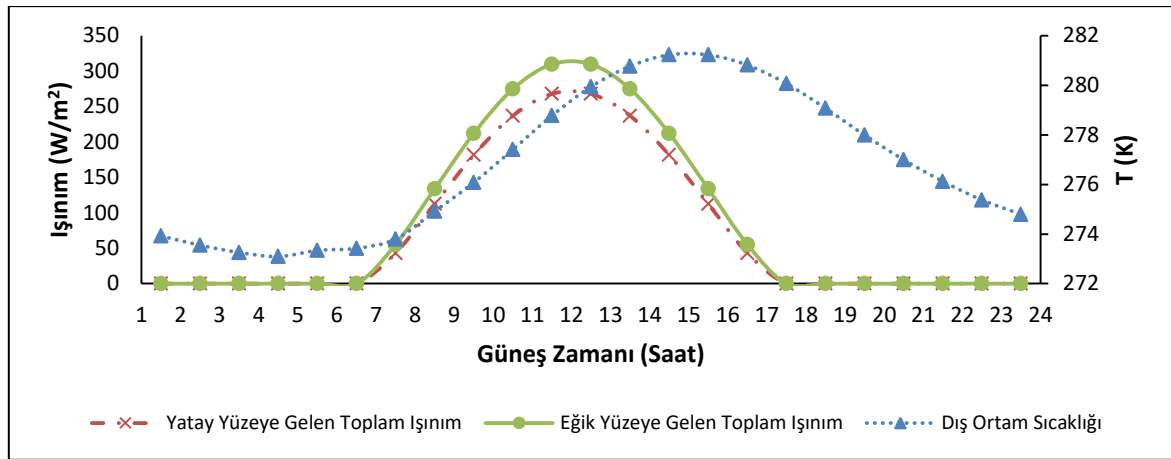
Cam tabaka, akış kanalından geçen hava, ısı kütle için yazılan enerji dengelerine ait denklemler eşzamanlı olarak çözülmüştür. Bilinmeyen sıcaklıklar (T_g , T_f , T_w) için başlangıç değerleri tahminlenmiştir. Bu değerler kullanılarak hava özellikleri, ışınlama ve taşınımla ısı geçiş katsayıları hesaplanmıştır. İterasyon belirlenen yakınsama düzeyine ulaşılan dek sürdürülmüştür.

Trombe duvarı ısı verimi, ısıtılan mekana iletim ve taşınım ile aktarılan ısı ile ısı kütle yüzeyine gelen güneş ışınlama değerleri kullanılarak aşağıdaki eşitlikten hesaplanır (Duan, vd, 2016).

$$\eta = \frac{(q_{conv} + q_{cond})}{I_T A_w}$$

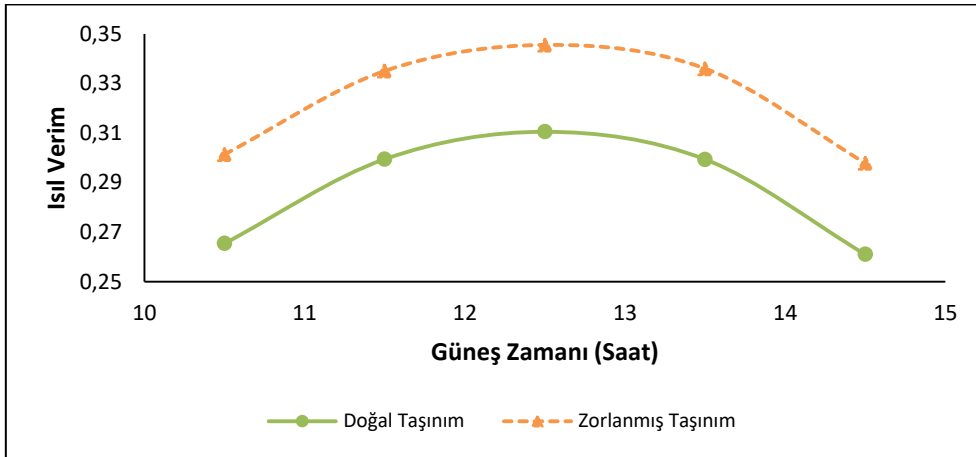
4. BULGULAR

Bu çalışmada Edirne ilinde Şubat ayını temsil eden güne ait iklim koşullarındaki Trombe duvarının ısı performansı incelenmiştir. Trombe duvarında yer alan ısı kütleli yüksekliği, havanın giriş ve çıkışındaki menfez yükseklikleri, cam tabaka ile ısı kütleli arası mesafe ve ısı kütleli malzemesi Yılmaz vd. (2018) tarafından incelenen çalışmada elde edilen en iyi değerler dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu kapsamda Trombe duvarında yer alan ısı kütleli yüksekliği 1,8 m, cam tabaka ile ısı kütleli arası mesafe 0,1 m, havanın giriş ve çıkışındaki menfez yükseklikleri 0,1 m ve ısı kütleli malzemesi betonarme olarak alınmış ve analizler gerçekleştirilmiştir. Edirne’de Şubat ayını temsil eden gün için hava sıcaklığının, yatay ve 90° eğimli yüzeye gelen güneş ışınımının saatlik değişimi Şekil 5’de gösterilmektedir.



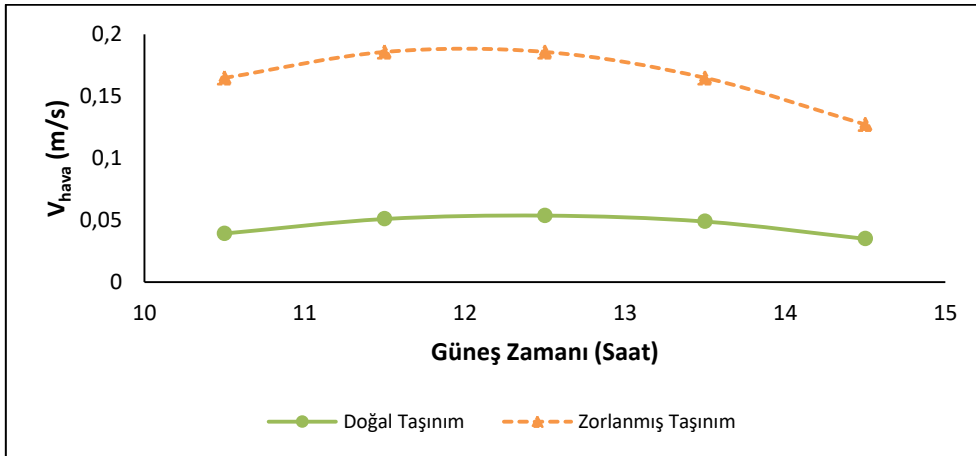
Şekil 5. Edirne ilinde Şubat ayını temsil eden güne ait dış ortam sıcaklığı ve güneş ışınımının saatlik değişimi.

Güneş öğlesinde ısı verim zorlanmış taşınımlı sistemde %34,5 olurken, doğal taşınımlıda %31,1 düzeyine çıkmıştır. ısı verimin günlük ortalama değeri zorlanmış dolaşımli sistemde %32,3, doğal dolaşımli sistemde %28,7 bulunmuştur. Analiz yapılan saatlerde fan kullanımı nedeniyle zorlanmış taşınımlı Trombe duvarının ısı verimi doğal taşınımlı Trombe duvarının ısı verimine göre ortalama %12,6 oranında daha yüksek bulunmuştur (Şekil 6).



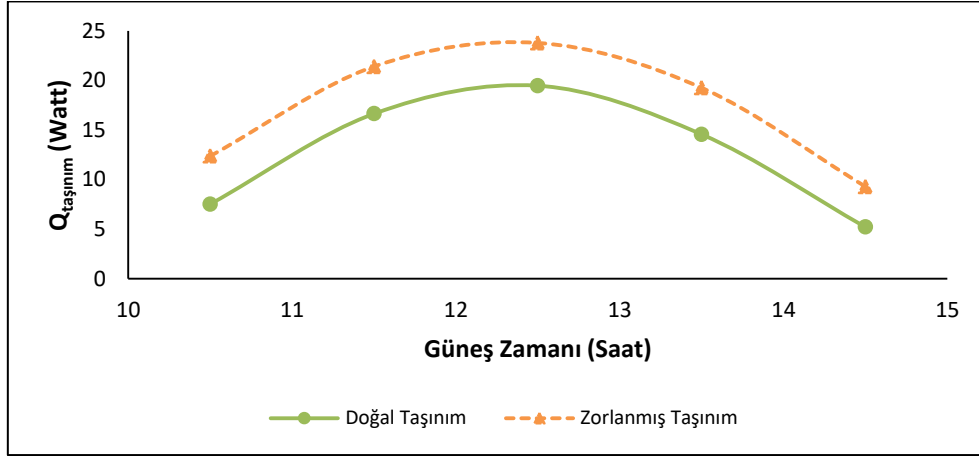
Şekil 6. Isıl verimin günlük değişimi.

Akış kanalında havanın hızı gün boyunca doğal taşınımlı tasarımda 0,035 m/s ile 0,054 m/s arasında, zorlanmış taşınımlı tasarımda 0,127 m/s ile 0,186 m/s arasında değişmiştir (Şekil 7).



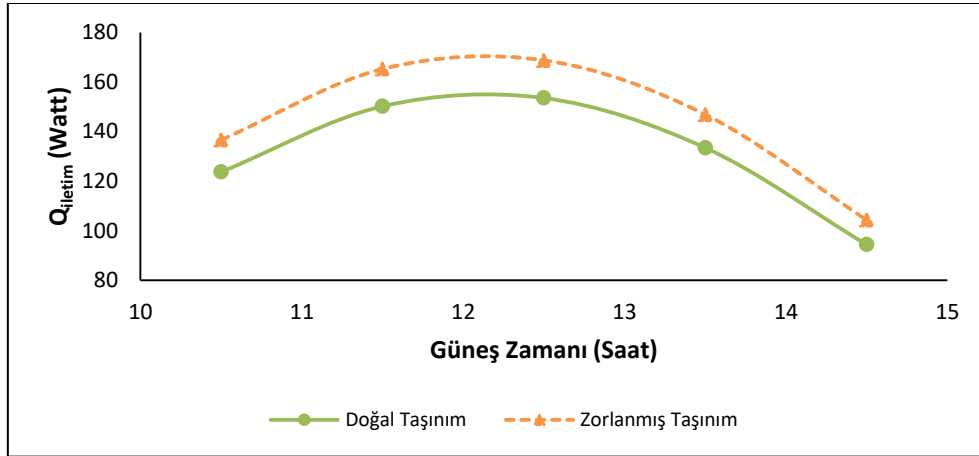
Şekil 7. Akış kanalında hava hızının değişimi.

Akış kanalındaki hava hareketi ile mekan içine taşınım yolu ile aktarılan enerji zorlanmış taşınımlı tasarımda analiz yapılan saatler boyunca 9,3 W ile 23,8 W arasında, doğal taşınımlı tasarımda ise taşınım ile aktarılan enerji 5,2 W ile 19,5 W arasında değişim göstermiştir (Şekil 8). Mekana taşınım ile aktarılan günlük toplam enerji, doğal taşınımlı sistemde 228,28 kJ/gün, zorlanmış taşınımlı sistemde ise 309,96 kJ/gün olarak hesaplanmıştır.



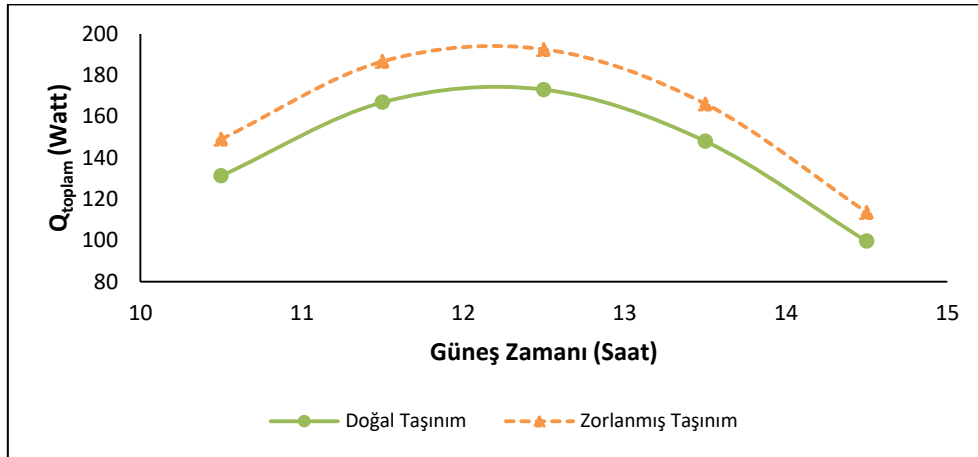
Şekil 8. Taşınım ile mekan içine aktarılan ısı enerjisi.

Isıl kütlede mekan içine iletim ile ısı geçişi zorlanmış taşınım tasarımda 104,4 W ile 168,7 W, doğal taşınım tasarımda ise 94,4 W ile 153,5 W arasında değişmiştir (Şekil 9). Gün boyunca ısı kütlede iletimle aktarılan enerji, doğal taşınım sistemde 2359,1 kJ/gün, zorlanmış taşınım sistemde ise 2598,7 kJ/gün olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9. Isıl kütlede mekan içine iletimle ısı geçişi.

Isıtılan mekana aktarılan toplam (taşınım ve iletim) enerji doğal taşınım sistemde 99,6 W ile 173 W, zorlanmış dolaşımlıda 113,7 W ile 192,5 W arasında değişmiştir (Şekil 10). Günlük toplam güneş kazancı doğal dolaşımlı sistemde 2587,4 kJ/gün, zorlanmış dolaşımlıda ise 2908,7 kJ/gün olmuştur.



Şekil 10. Günlük toplam güneş kazancı.

Mekan içine aktarılan toplam ısı geçişinde, zorlanmış taşınımlı tasarımda doğal taşınımlı tasarıma göre fan kullanımı nedeniyle %12,4 oranında artış hesaplanmıştır. Trombe duvarı ile mekan arasında taşınım ile ısı geçişinde doğal taşınımlı tasarıma göre zorlanmış taşınımın sağladığı artış oranı %35,8 olarak bulunmuştur. Benzer şekilde ısıl kütlelen iletilim ile aktarılan enerjideki artış oranı, zorlanmış taşınımlı tasarım lehine %10,2 olarak elde edilmiştir. İncelenen tasarımda akış laminer rejimde olmasına karşın gün boyunca zorlanmış taşınımlı tasarımdaki akışkan hızının doğal taşınımlı tasarımdaki akışkan hızına göre ortalama 3,8 kat daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, yapılan analizlerden elde edilen verilere bakıldığında hava hareketi için fanın kullanıldığı zorlanmış taşınımlı tasarıma sahip Trombe duvarının doğal taşınımlı tasarıma sahip Trombe duvarına göre daha iyi performans gösterdiği görülmektedir.

EK 1. NUSSELT SAYISI HESAPLANMASI

Ek 1.1. Havalandırmalı Trombe sistemi (fansız)

Cam tabaka ve kanaldan geçen hava, ısıl kütle ve kanaldan geçen hava arasındaki doğal taşınım ile ısı geçişine ait ısı taşınım katsayısı laminer akış ($Ra_L \leq 10^9$) rejiminde

$$Nu = 0,68 + \frac{0,67Ra_L^{1/4}}{[1+(0,492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (\text{Ek1.1})$$

eşitliği kullanılarak veya tüm Rayleigh sayılarını kapsayan Churchill ve Chu tarafından önerilen

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387Ra_L^{1/6}}{[1+(0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (\text{Ek1.2})$$

bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır (Bergman vd., 2015).

Cam örtüden rüzgar nedeniyle oluşan taşınım ile ısı geçişi aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır (Duffie vd., 2020).

$$h_w = 2,8 + 3V \quad (\text{Ek1.3})$$

Bu bağıntılarda hava özellikleri ortalama akışkan sıcaklığında alınmıştır (Bergman vd., 2015; Duffie vd., 2020).

Ek 1.2. Havalandırılmalı Trombe Sistemi (Fanlı)

Dikdörtgen kesitli kanalda tam gelişmiş laminer akışta ($Re \leq 2300$) Nusselt sayısı, geometriye bağlı olarak değişmektedir. Isıl kütle yüzeyinde sabit ısı akısı koşullarında Nu sayısı değerleri Tablo 1'den akış kesit alanının boyut (en/genişlik) oranına bağlı olarak alınır.

Tablo 1. Farklı kesitlerdeki kanallarda tam gelişmiş laminer akışta Nusselt sayıları (Bergman vd., 2015).

a/b	1,43	2,0	3,0	4,0	8,0	∞
Nu	3,73	4,12	4,79	5,33	6,49	8,23

Reynolds sayısı ve Nusselt sayısı hesaplamalarında hidrolik çap (D_h) kullanılır (Bergman vd., 2015).

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (\text{Ek1.4})$$

EK 2. IŞINIMLA ISI GEÇİŞ KATSAYISI

Cam örtü ve ısıl kütle arasındaki ışınlama ile ısı geçişi

$$h_{r,w-g} = \frac{\sigma(T_g^2 + T_w^2)(T_g + T_w)}{(1/\epsilon_g + 1/\epsilon_w - 1)} \quad (\text{Ek2.1})$$

cam tabala ve gök arasında ışınlama ile ısı geçişi

$$h_{r,g-s} = \frac{\sigma\epsilon_g(T_g + T_s)(T_g^2 + T_s^2)(T_g - T_s)}{(T_g - T_a)} \quad (\text{Ek2.2})$$

ve gök sıcaklığı

$$T_s = 0,0552T_a^{1,5} \quad (\text{Ek2.3})$$

bağıntıları kullanılarak bulunur (Bergman vd., 2015; Duffie vd., 2020).

Kaynakça

- Abed, A.A, Ahmed, O.K., Weis, M.M, Ahmed, A.K. and Ali, Z.H. (2021). Influence of glass cover on the characteristics of PV/trombe Wall with BI-fluid cooling. *Case Studies in Thermal Engineering*. 27, 101273. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101273>.
- Abdeen, A., Serageldin, A.A., Ibrahim, M.G.E., El-Zafarany, A., Ookawara, S. and Murata, R. (2019).

- Experimental, analytical, and numerical investigation into the feasibility of integrating a passive Trombe wall into a single room. *Applied Thermal Engineering*. 154, 751-768. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.090>.
- Abergel, T. and Delmastro, C., Is cooling the future of heating? 13 December 2020
<https://www.iea.org/commentaries/is-cooling-the-future-of-heating>, Erişim Tarihi: 08.04.2023.
- Abdullah, A.A., Atallah, F.S., Ahmed, O. K. and Alguburi, S. (2022). Effect of dusty weather on the performance of the PV/Trombe wall: Experimental assessment. *Case Studies in Thermal Engineering*. 39, 102419. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102419>.
- Agurto, L., Allacker, K., Fissore, A., Agurto, C. and De Troyer, F. (2020). Design and experimental study of a low-cost prefab Trombe Wall to improve indoor temperatures in social housing in the Biobio region in Chile. *Solar Energy*. 198, 704-721. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.003>.
- Ahmed, O.K., Hamada, K.I. and Salih, A.M. (2019). Enhancement of the performance of Photovoltaic/Trombe wall system using the porous medium: Experimental and theoretical study. *Energy*. 171, 14-26. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.001>.
- Bergman, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P. and Dewitt, D.P. (2015). Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri. Palme Yayıncılık.
- Bevilacqua, P., Benevento, F., Brunu, R. and Arcuri, N. (2019). Are Trombe wall suitable passive systems for the reduction of the yearly building energy requirements? *Energy*. 185, 554-566. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.003>.
- Bojic, M., Johannes, K. and Kuznik, F. (2014). Optimizing energy and environmental performance of passive Trombe Wall. *Energy and Buildings*. 70, 279-286. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.062>.
- Charqui, Z., El Moutaouakil, L., Boukendil, M., Hidki, R., Zrikem, Z. and Abdelbaki, A. (2023). Numerical simulation of turbulent coupled heat transfer in a Trombe wall subjected to periodic thermal excitations. *Energy and Buildings*. 278, 112631. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112631>.
- Dimassi, N. and Dehmani, L. (2016). Experimental heat flux analysis of a solar wall design in Tunisia. *Journal of Building Engineering*. 8, 70-80. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2016.10.001>.
- Duan, S., Jing, C. and Zhao, Z. (2016). Energy and exergy analysis of different Trombe walls. *Energy and Buildings*. 126, 517-523. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.052>.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A. and Blair, N. (2020). Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind. 5nd edition. John Wiley and Sons, 905s.
- ETKB, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Türkiye Ulusal Enerji Planı. (2022). [https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye Ulusal Enerji Plan %C4%B1.pdf](https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye%20Ulusal%20Enerji%20Plan%C4%B1.pdf), Erişim Tarihi: 08.04.2023
- Eurostat. (2022). Energy consumption in households. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households#Energy_consumption_in_households_by_type_of_end-use, Erişim Tarihi: 27 Mart 2023.
- Guyot, G., Walker, I., Sherman, M., Linares, P., Ortega, S.G. and Caillou, S. (2019). A review of performance-based approaches to residential smart ventilation, International Energy Agency's Energy in Buildings and Communities Programme, Ventilation Information Paper no 39, March

2019. <https://www.aivc.org/> Erişim Tarihi: 27 Mart 2023.
- Hu, Z., He, W., Ji, J. and Zhang, S. (2017). A review on the application of Trombe wall system in buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 976-987. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.003>.
- Ibrahim, A.K., Algburi, S. and Ahmed, O.K. (2023). Enhancement of the performance of the PV Trombe Wall: A short review, *Cleaner Engineering and Technology*, 14, 100652. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100652>.
- Jaber, S. and Ajib, S. (2011). Optimum design of Trombe wall system in mediterranean region. *Solar Energy*. 85, 1891-1898. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.04.025>.
- Jie, J., Hua, Y., Gang, P., Bin, J. and Hei, H. (2007). Study of PV-Trombe wall assisted with DC fan. *Building and Environment*. 42, 3529-3539. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.038>.
- Mokni, A., Lashin, A., Ammar, M. and Mhiri, H. (2022). Thermal analysis of a Trombe wall in various climatic conditions: An experimental study. *Solar Energy*. 243, 247-263. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.08.011>.
- Olenets, M., Piotrowski, J.Z. and Stroy, A. (2015). Heat transfer and air movement in the ventilated air gap of passive solar heating systems with regulation of the heat supply. *Energy and Buildings*. 103, 198-205. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.051>.
- Piotrowski, J.Z., Stroy, A. and Olenets, M. (2013) Mathematical modelling of the steady state heat transfer processes in the convectonal elements of passive solar heating systems. *Archives of civil and mechanical engineering*. 13, 394-400. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2013.02.002>.
- Rabani, M. (2022). Experimental comparison of energy and exergy analysis of a new designed and a Normal Trombe Wall. *Energy*. 260, 125050. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125050>.
- Sa, A.C.B., Martins, A., Boaventura-Cunha, J., Lanzinha, J.C. and Paiva, A. (2017). An analytical approach to assess the influence of the massive wall material, thickness and ventilation system on the Trombe wall thermal performance. *Journal of Building Physics*. March, 1-24. <https://doi.org/10.1177/1744259117697389>.
- Shoubi, M. V., Masoud Shoubi, V., Bagchi, A. and Barough, A.Z. (2015). Reducing the operational energy demand in buildings using building information modeling tools and sustainability approaches. *Ain Shams Engineering Journal*. 6, 41-55. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2014.09.006>.
- Yaman, M. (2021). Different Façade Types and Building Integration in Energy Efficient Building Design Strategies, *International Journal of Built Environment and Sustainability*. Published by Penerbit UTM Press. Universiti Teknologi Malaysia. IJBES 8(2)/2021, 49-61.
- Yılmaz, R., Kırtepe, E. ve Özbalta, N. (2018) Trombe duvarı ısı performansının parametrik araştırılması. *Uluslararası Katılımlı Anadolu Enerji Sempozyumu*. Cilt 1, 354-363, 18-20 Nisan 2018, Edirne.

