



Araştırma Makalesi–Research Article

# Manisa İçin Farklı Tipteki Trombe Duvarlarının Enerji, Ekonomi ve Çevresel Analiz Sonuçlarının Karşılaştırması

## Comparison of Energy, Economy, and Environmental Analysis Results of Different Types of Trombe Walls for Manisa

Erdem Ersayın<sup>1\*</sup>

Geliş / Received: 31/08/2022

Revize / Revised: 31/01/2023

Kabul / Accepted: 31/01/2023

### ÖZ

Dünya genelinde artan enerji talebi ve bu talebin fosil kaynaklı yakıtlardan karşılanması küresel ısınma gibi olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Bu sonuçların etkisini azaltmak için yenilenebilir kaynakların kullanımı önem kazanmaktadır. Binaların ısıtılması da enerjiye bağımlılığı fazla olan bir alandır, bu alanda güneş enerjisinden yararlanmak güneşlenme süresi fazla olan konumlar için avantajlıdır. Manisa da güneşlenme süresi bakımından avantajlıdır. Güneş ile ısıtma uygulamalarından bir tanesi Trombe duvarıdır. Bu çalışma kapsamında klasik bir Trombe duvarı (Tip-1) ve farklı yapıda bir Trombe duvarı (Tip-2) tasarımı yapılmıştır ve bu iki tip duvarın enerji, ekonomik ve çevresel analizleri karşılaştırılmıştır. Analizlerde Trombe duvarları için önemli birer parametre olan hava boşluğu genişliği ve toplam güneş ışınım miktarı değişimi ele alınmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda Ocak ayı için ideal çalışma parametrelerinde (500 W/m<sup>2</sup> toplam güneş ışınım miktarı ve 0,35 m hava boşluğu genişliği için) Tip-1 ve Tip-2 duvarlar için enerji verimliliği sırasıyla 0,37 ve 0,46 olarak bulunmuştur. Yine bu parametrelerde iç ortam sıcaklığının saat 15.00'te Tip-1 ve Tip-2 duvarlar için 19,6 °C ve 21,8 °C'lik maksimum değerlere çıktığı hesaplanmıştır. Ekonomik analize göre Tip-1 ve Tip-2 duvarların geri ödeme süreleri sırasıyla 7,3 ve 6,9 yıl olarak bulunmuştur. Tip-1 ve Tip-2 duvarların kullanımı aynı zamanda karbon salımında da toplamda sırasıyla 5985,5 kg ve 6405 kg azalma sağlamıştır.

**Anahtar Kelimeler-** Trombe Duvarı, Pasif Isıtma, Güneş Enerjisi, Güneş Işınımı Yoğunluğu

### ABSTRACT

Increasing energy demand around the world and meeting this demand from fossil fuels cause negative consequences such as global warming. For reducing the impact of these results, the use of renewable resources is gaining importance. Heating of buildings is a high energy dependent process, thus benefiting from solar energy is advantageous for locations with a long hours of sunshine. Manisa is also advantageous in terms of sunshine duration. One of the solar heating applications is the Trombe wall. In this study, a classical Trombe wall (Type-1) and a different type of Trombe wall (Type-2) were designed and these two types of walls were compared in terms of energy, economic and environmental aspects. During analyzes, the air channel depth and the variation of solar radiation intensity, which are important parameters for Trombe walls, are discussed. As a result of the calculations, the energy efficiency for Type-1 and Type-2 walls was found to be 0,37 and 0,46, respectively, at the optimized operating parameters for January (for 500 W/m<sup>2</sup> solar radiation intensity and 0,35 m air duct depth). Again with these parameters, it has been calculated that the indoor temperature rises to the maximum values of 19,6 °C and

<sup>1\*</sup>Sorumlu yazar iletişimi: [erdem.ersayin@cbu.edu.tr](mailto:erdem.ersayin@cbu.edu.tr) (<https://orcid.org/0000-0001-7900-0916>)

Makine Mühendisliği Bölümü, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Manisa, Türkiye

21,8 °C for Type-1 and Type-2 walls at 15.00. Economic analysis indicated that payback period of the Type-1 and Type-2 walls are 7,3 and 6,9 years, respectively. It has been calculated that the use of Type-1 and Type-2 walls provides a reduction of 5985,5 kg and 6405 kg in total carbon emissions, respectively

**Keywords- Trombe Wall, Passive Heating, Solar Energy, Solar Radiation Intensity**

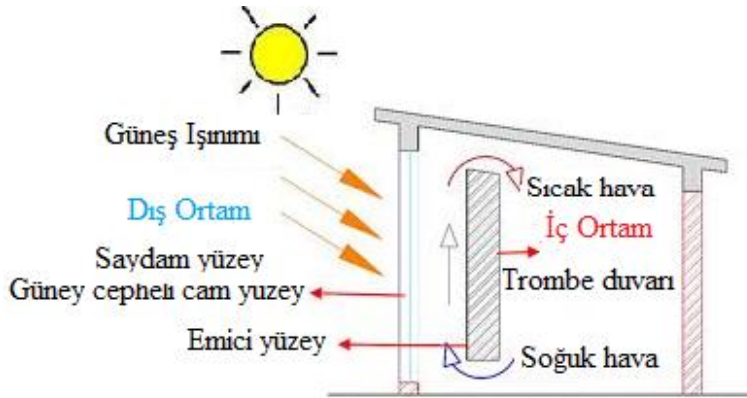
## I. GİRİŞ

2040 yılına kadar dünya genelindeki enerji ihtiyacının 2015 yılındaki enerji ihtiyacına göre % 37 oranında fazla olacağı araştırmacılar tarafından ortaya konmuştur [1]. Bunun yanı sıra dünyadaki ortalama sıcaklığın 2030 yılına kadar 1.5°C artacağı ve bunun da beraberinde iklim kaynaklı birçok sorunu getireceği bilinmektedir [2]. Tüm bu sebeplerden dolayı enerji kaynağı olarak yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmak bahsedilen iklim sorunlarını azaltmak için önemli bir adım olacağı gibi aynı zamanda fosil yakıt kaynaklarının kullanımından doğan sera gazı salımlarını azaltma konusunda da yardımcı olacaktır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlilerinden biri olan güneş, günümüzde birçok gelişmiş ülkenin enerji politikasında kendine önemli bir yer bulmaktadır. Güneş enerjisinin güneş gibi tükenmeyen bir kaynağa sahip olması, birçok coğrafi bölgede yüksek seviyede güneşlenme süresinin olması, güneşten yararlanma teknolojilerinin gittikçe olgunlaşması ve de üretim sonucunda herhangi bir sera gazı salımı olmaması gibi avantajları mevcuttur [3].

Güneşten yararlanarak elektrik veya ısı enerji elde etmek için geliştirilen teknikler aktif veya pasif sistemler olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Aktif sistemler genel anlamda güneş enerjisi kaynaklı çalışan güç üretim sistemleridir ve bu sistemler geniş alana yayılan güneş toplayıcılarını, enerji depolama ünitelerini, yardımcı çalışma akışkanlarını, pompaları, fanları içerisinde barındırmaktadır [4]. Pasif sistemler ise doğal veya zorlanmış taşınım vasıtasıyla güneş enerjisinden yararlanıp mahal ısıtma-soğutmasını ve su ısıtmasını yapmayı hedefleyen sistemlerdir. Pasif sistemler, aktif sistemlere göre kurulum ve işletme maliyeti olarak oldukça avantajlıdır ancak kullanım amaçlarının da farklı olduğu göz ardı edilmemelidir.

Trombe duvarı diğer pasif sistemler arasında en sık uygulama alanı bulan sistemdir [5]. Trombe duvarı imalatı ile ilgili ilk çalışmalar 19.yüzyılın sonlarına dayanmaktadır, Edward Morse isimli bilim insanı 1881 yılında Trombe duvarı çalışma mantığına benzer bir sistemi tasarlamıştır [6]. Daha sonra 1940 ve 1946 yıllarında Fred Keck ve Arthur Brown isimli bilim insanları bu sistemi farklı eklentilerle geliştirmişlerdir. Son olarak da 1967 yılında Felix Trombe ve Jacques Michel günümüzde Trombe duvarı olarak adlandırılan sistemin patentini almışlar ve bina içerisindeki uygulamasını gerçekleştirmişlerdir [7].

Şekil 1’de standart bir Trombe duvarı gösterilmiştir. Trombe duvarı, binaların güney cephesine bakacak şekilde inşa edilen, ışıma etkisinden maksimum oranda yararlanmak için koyu renk boyanan ve de masif bir duvar ile genellikle camdan yapılan saydam bir yüzey arasında hava boşluğu barındıran bir yapı olarak tanımlanabilir.



Şekil 1. Standart bir Trombe duvarı

Trombe duvarı inşası için tuğla, farklı tiplerde taşlar, güçlendirilmiş beton gibi yapı elemanları kullanılabilir. Duvar ile cam yüzey arasında ise havanın yanı sıra farklı tipte akışkanlar da kullanılabilir [8]. Güneş ışınımının masif duvar yüzeyini ısıtması Trombe duvarının temel çalışma prensibini oluşturur. Sıcaklığı artan masif duvar, mahal içerisindeki havayı ışınım ve de taşınım ısı transferi mekanizmalarıyla ısıtırken, duvar yüzeyinin alt ve üst kısımlarında bulunan havalandırma kanalları gerekli hava dolaşımının gerçekleşmesini sağlar [9].

Trombe duvarı kullanımı esnasında elde edilen ısı verime etkiyen farklı parametreler vardır. Bu parametreler kullanılan cam sayısı, hava boşluğu, masif duvar, ısı yalıtım, havalandırma kanalları ve masif

duvardaki pencere kullanımı olarak sınıflandırılabilir [2]. Ilıman iklim şeklinde kış koşullarına sahip yerlerde tek cam ve tuğladan yapılmış masif duvar gerekli performansı vermektedir. Kışları soğuk geçen yerlerde ise çift cam ve masif duvar kullanımı daha iyi sonuç vermektedir, çünkü bu tarz bir sistemin ısı direnci yüksek olmaktadır [10]. Helenice ve ark., çeşitli cam malzemelerinin etkisini incelemiştir ve diament tipi malzemenin daha iyi ısı performans gösterdiğini belirlemiştir [11]. Stazi ve ark., çalışmalarında tek ve çift cam kullanımının karşılaştırmasını yapmışlardır ve çift cam kullanımının ısı performansının daha yüksek olduğunu belirlemiştir [12,13]. Zalewski ve ark., tek, çift ve düşük yayımlı çift camlı sistemleri inceledikleri araştırmalarında düşük yayımlı sistemlerin daha çok enerji depolayabildiğini ortaya koymuşlardır [14]. Blotny ve ark., ise üç camlı ve camlar arasında argon bulunan bir Trombe duvarının Polonya'nın Wroclaw kentindeki uygulamasını analiz etmişler ve bu tip bir tasarım ile oda sıcaklığında 1.52 °C artış gözlemlemiştir [15]. Hava boşluğunun kalınlığı Trombe duvarındaki taşınım ısı transferi mekanizmasını etkilediği için çok önemli bir parametredir. Hava boşluğu kalınlığının hem masif duvar hem de iç ortam hava sıcaklığı üzerinde etkisi vardır. Yapılan çalışmalara göre soğuk iklim koşulları için 29 ile 35 cm değerindeki hava kalınlığı tercih edilmelidir [16]. Literatürde ayrıca bu hava boşluğundaki ısı kaybını azaltmak için ısı perde kullanımı, hava boşluğunun iç dolaşıma sokulması gibi iyileştirme önerileri de sunulmuştur [2]. Masif duvar, güneş enerjisinden gelen ışınım enerjisini ısı enerji olarak depolayan eleman olduğu için bu kısımda kullanılan malzeme seçimi ve duvar kalınlığı depolanan enerjinin miktarı için önemlidir. Masif duvarın temel olarak yeterli ısı kütleyle sahip olması istenmektedir. Masif duvarın kalınlığı bölgenin coğrafi konumuna, güneşlenme süresine ve yardımcı ısı enerji kaynaklarının enerji üretim maliyetine göre seçilmektedir. Bojic ve ark., Fransa'da yaptıkları çalışmalarında ısıtma için sırasıyla elektrik ve doğalgaz kullanılırsa 35 ve 25 cm'lik duvar kalınlıklarının yeterli olacağını belirlemiştir [17]. Farklı coğrafi bölgeler için masif duvar kalınlığının ısı performans üzerine etkilerinin incelendiği çalışmalarda literatürde sıklıkla rastlanırken [18-22] faz değiştiren malzemelerin duvar içerisinde kullanılıp ısı kütleli artırması yönündeki çalışmalar ile de karşılaşılmaktadır. Fiorito, yaptığı çalışmada beş farklı iklim bölgesi için faz değiştiren malzemenin ısı performans üzerindeki etkisini incelemiştir [23]. Trombe duvarının özellikle gece periyodu boyunca yüksek ısı kaybına sahip olması önemli bir dezavantajdır [8]. Çünkü gündüz periyodu boyunca yüksek miktarda ısı enerji depolayan duvar gece periyodunda bu enerjisini hızlı biçimde kaybedebilmektedir. Bu kaybı azaltmak için ısı yalıtım malzemelerinin kullanımı araştırmacılar tarafından incelenmiştir ve ısı yalıtım malzemesinin kompozit tipteki Trombe duvarlarında kullanımının verimi arttıracaklarını belirlemiştir [24]. Klasik bir Trombe duvarında yalıtım malzemesinin kullanımı gündüz periyodundaki ısı depolama miktarını düşürebileceği için özellikle soğuk iklim koşullarındaki uygulamalarda yeni tip ısı yalıtım malzemelerinin kullanımı araştırılmalıdır. Masif duvarın alt ve üst kısımlarında bulunan havalandırma kanallarından iç mekân ile Trombe duvarında bulunan hava boşluğu arasındaki ısı ve kütle transferi gerçekleşir. Bu kanalların açık kalma süreleri ve açılma zamanları duvarın bulunduğu coğrafi konum ile bağlantılıdır ve otomasyon sistemiyle kontrol edilirse duvardan elde edilen verimin artacağı belirlenmiştir. Havalandırma kanallarının boyutlarının ve kanal toplam alanının masif duvar alanına oranının da Trombe duvarının ısı verimi üzerinde etkisi olan geometrik parametrelerden olduğu bilinmektedir. Liu ve ark., yaptıkları çalışmada havalandırma kanallarının gün doğumundan iki veya üç saat sonra açılmasının ve de gün batımından bir saat sonra kapatılmasının verim üzerinde optimum etkiye sahip olduğunu belirlemiştir [25]. Briga ve ark., Portekiz'deki bir yapı için havalandırma kanalının oda içindeki sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisini incelemiştir [18]. Kaya ve ark., havalandırma kanal sayısının ısı verim üzerine etkisini inceleyen çalışmalarında sekiz adet havalandırma kanalına sahip olan ve toplam duvar alanının %8'i kadar havalandırma kanal alanı olan tasarımın en yüksek ısı verimi verdiğini bulmuşlardır [26]. Trombe duvarında pencere kullanımı da araştırmacıların ilgisini çeken bir konudur. Pencere kullanımıyla gündüz periyodunda iç mekânın daha hızlı güneş ışınımı etkisine girmesi sağlanabilir ve de insan yaşantısı için gerekli olan güneş ışığından verimli şekilde yararlanılabilir. Öte yandan pencere kullanımının özellikle soğuk iklim kuşağına sahip konumlar için depolanan ısı miktarı üzerinde olumsuz etkisi de bulunmaktadır. Ancak sıcak geçen kış mevsimine sahip konumlarda pencere kullanımının olumsuz etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Bellos ve ark., Yunanistan'ın Atina kentinde yaptıkları çalışmada pencere ve penceresiz Trombe duvarının karşılaştırmalı analizini yapmışlar ve iki durum arasındaki sıcaklık farkını yalnızca 0.5 K olarak belirlemiştir [27].

Günümüzde klasik Trombe duvarının yanı sıra geliştirilmiş Trombe duvarı, kompozit Trombe duvarı, fotovoltaik Trombe duvarı, faz değiştiren malzemeli Trombe duvarı, girintili-çıkıntılı Trombe duvarı, güneş enerjisi destekli Trombe duvarı ve akışkan malzemeli Trombe duvarı gibi farklı alternatifler de mevcuttur [2,8]. Geliştirilmiş Trombe duvarı, klasik Trombe duvarına ısı verimi arttırmak için otomasyonla çalışan hava girişleri, havalandırma perdeleri veya koruyucu yalıtım kaplamaları ilave edilmesiyle inşa edilir [2]. Kompozit Trombe duvarında ise ilave olarak havalandırma kanalı içeren ısı yalıtımlı duvar mevcuttur [24]. Bu duvar tipinde nem oluşumu gözlenmemekte ve bu da duvarın yapısına zarar verebilmektedir, bu sebeple kullanılan malzemenin tipi ve kalınlığının dikkatli biçimde seçilmesi gerekmektedir. Faz değiştiren malzemeli Trombe duvarında organik veya inorganik yapıdaki faz değiştiren malzemeler kullanılabilir. Yapılan araştırmalarda iklim koşullarına bağlı olarak faz değiştiren malzemenin kullanıldığı duvarların yıllık enerji tüketiminin %10-30 arasında düşebileceği gözlenmiştir [28]. Fotovoltaik Trombe duvarında masif duvardaki hava boşluğuna yerleştirilmiş

fotovoltaik paneller yer almaktadır. Bu sayede güneş ışınımı hem elektrik hem de ısı enerjisine dönüştürülebilmektedir [29]. Güneş enerjisi destekli Trombe duvarında ise gelen güneş ışınımının enerjisini depolamak için su tankları kullanılmaktadır [30]. Girintili-çıkıntılı Trombe duvarında pencere açıklıkları güneydoğu yönünde, duvar yüzeyleri ise güneybatı yönünde konumlandırılacak şekilde bir tasarım yapılır fakat bu tipteki bir duvarın soğuk iklim kuşağında kullanılması verimsizdir [2]. Akışkan malzemeli Trombe duvarında, düşük yoğunlukta ve yüksek ısı absorbe etme değerinde akışkan hava boşluğunda kullanılır. Bu tarz bir duvarın veriminin klasik Trombe duvarına göre daha fazla olduğu gözlenmiş olsa da [31] henüz ticarileşmemiş bir teknolojidir.

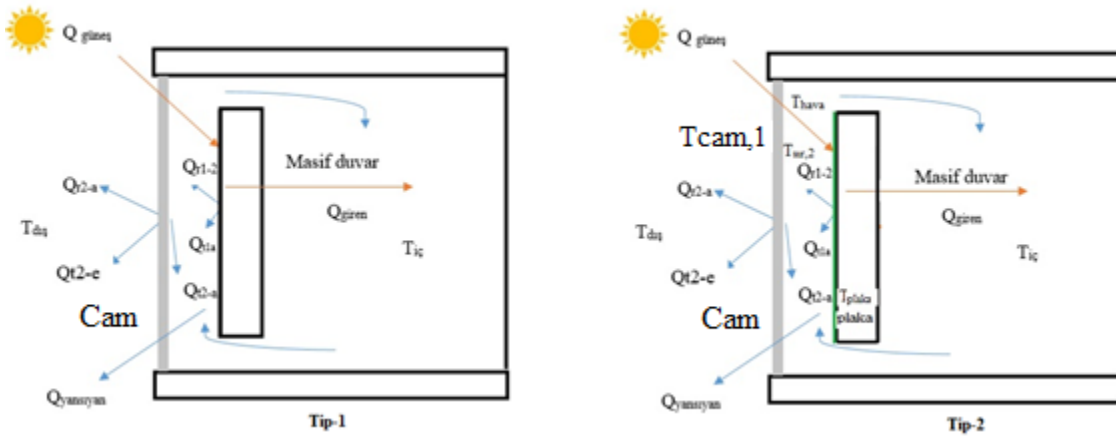
Literatür incelendiği zaman farklı tipte Trombe duvarı yapıları ile ilgili çeşitli çalışmalara rastlanmış olsa da bu çalışma kapsamında ele alınan duvar tiplerinin kullanımının Manisa ili için enerji verimleri ve iç ortam sıcaklıkları karşılaştırılmasını gösteren parametrik bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışma kapsamında Tip-1 olarak adlandırılan klasik bir Trombe duvarı ve de Tip-2 olarak adlandırılan absorber plakalı bir Trombe duvarı ele alınmıştır. Ayrıca Trombe duvarının hava boşluğu genişliği ve güneş yoğunluğu değişimi gibi parametrelerin de sistem verimi üzerine etkisi irdelenmiştir. Yine aynı şekilde bu duvar tiplerinin ekonomik ve çevresel analizinin enerji analiziyle beraber alındığı bir çalışmanın Manisa ili için yapılmadığı görülmüştür, bu açıdan da özellikle artan enerji maliyetlerinin ve çevresel etkilerin göz önüne alındığı bir uygulamanın literatürdeki boşluğu doldurması hedeflenmiştir.

## II. ANALİZ

Çalışma kapsamında incelenen Trombe duvarlarının enerji, ekonomik ve çevresel analizleri yapılmıştır.

### A. Enerji Analizi

Enerji analizi için iki farklı yapıdaki Trombe duvarının Manisa ilinde Ocak ayı kullanımının termodinamik yönden incelenmesi yapılmıştır. Ele alınan ilk Trombe duvarı klasik yapıdaki duvarken (Tip-1), ikinci Trombe duvarı masif duvar kısmına absorber plaka ilave edilmiş (Tip-2) tasarımıdır. Masif duvar malzemesi olarak siyah renk boyalı beton kullanılmıştır. Duvar için ısı iletim katsayısı, soğurganlık ve yayıcılık değerleri sırasıyla 0,5 W/m.K, 0,64 ve 0,9 olarak alınmıştır. Absorber plaka malzemesi olarak bakır seçilmiştir. Bakır için ısı iletim katsayısı, soğurganlık ve yayıcılık değerleri sırasıyla 398 W/m.K, 0,4 ve 0,2 olarak alınmıştır. İncelenen duvar tiplerinin şematik gösterimi Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekillerde “r” alt indisi ışınımın olan ısı transferini, “t” alt indisi taşınımın olan ısı transferini, “e” alt indisi çevresel ortamı, “a” alt indisi havayı göstermektedir.



Şekil 2. Tip-1 ve Tip-2 Trombe duvarlarının şematik gösterimi

Trombe duvarının her iki tipinin de eklendiği odanın temel tasarım parametreleri olarak Tablo 1’de verilen değerler ele alınmıştır.

**Tablo 1.** Trombe duvarının bulunduğu odanın tasarım parametreleri

Oda boyutları (m)	3 x 3 x 3
Cam boyutları (m)	3 x 3
Cam tabaka kalınlığı (m)	0,005
Hava tabakası kalınlığı (m)	0,012
Havalandırma kanalı (m)	0,2 x 0,2
Hava boşluğu genişliği (m)	0,15-0,35

Analizin yapıldığı Manisa ili için hesaplamalarda gerekli olacak güneş ışınımı ve diğer değerler ise Tablo 2’de sunulmuştur [32].

**Tablo 2.** Manisa iline ait güneş ışınımı ve ilgili veriler

Enlem – Boylam	27 08' ve 29 05' doğu boylamları ile 38 04' ve 39 58' kuzey enlemleri arası
Dikey ışınım miktarı ( kWh/m <sup>2</sup> )	1761,6
Toplam ışınım miktarı ( kWh/m <sup>2</sup> )	1718,3
Yagın ışınım miktarı ( kWh/m <sup>2</sup> )	629,8

Trombe duvarı ile ilgili hesaplamalar yapılırken bazı kabuller yapılmıştır ve bunlar aşağıda sunulmuştur.

- Hava boşluğundaki sıcaklık değişimi akış hareketinin olduğu yöndedir.
- Sistem bileşenlerindeki ısı transferi tek boyutludur.

Klasik Trombe duvarı için hesaplamalar yapılırken Piotrowski ve ark.’nın kullandığı yaklaşım temel alınmıştır [33].

Masif duvar ve cam yüzeyi enerji dengesi denklemleri aşağıda verilmiştir. 1 numaralı denklem masif duvar için 2 numaralı denklem ise cam yüzey için uygulanmıştır [33]. 1-7 numaralı denklemlerde zamana bağlı değişim olmadığı kabulü yapılmıştır. Bu denklemlerde Q ısı geçişini (W/m<sup>2</sup>), z güneş soğurganlık (yutma) katsayısını, h ısı taşınım katsayısını (W/m<sup>2</sup>°C), T sıcaklığı (°C), ε yayılcılığı, σ Stefan-Boltzmann sabitini (Wm<sup>2</sup>K<sup>-4</sup>), b hava boşluğu genişliğini (m), c özgül ısıyı (W/m<sup>3</sup>°C), m kütleli debiyi (kg/s), f geçirgenliği, L uzunluğu (m), ρ yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>), ξ yerel direnç faktörünü, λ sürtünme faktörünü, v ortalama hızı (m/s) D<sub>h</sub> hidrolik çapı (m) göstermektedir. t alt indisi taşınım ile olan ısı transferini, a alt indisi havayı, r alt indisi ışınım ile olan ısı transferini, dış alt indisi ise dış ortamı temsil etmektedir. Tablo 3’te denklemlerdeki sembollerin sayısal değerleri verilmiştir.

**Tablo 3.** Denklemlerdeki sembollerin sayısal değerleri

Sembol	Değer
z(-)	0,64
ε(-)	0,89
b (m)	0,35
λ(-)	0,4
D <sub>h</sub> (m)	0,62
L (m)	3

$$Q_{\text{güneş}} - Q_{\text{yansıtılan}} = Q_{r1-2} + Q_{t1-a} + Q_{\text{giren}} \quad (1)$$

$$Q_{r1-2} \pm Q_{t2-dış} = Q_{t2-dış} + Q_{r2-a} \quad (2)$$

$$z_p \cdot Q_{\text{güneş}} \cdot f = \varepsilon_{1-2} \sigma \left[ \left( \frac{T_1 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2 + 273}{100} \right)^4 \right] + h_{t1}(T_1 - T_{\text{hava1}}) + h_{iç}(T_1 - T_{iç}) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \varepsilon_{1-2} \sigma \left[ \left( \frac{T_{1(x)} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{2(x)} + 273}{100} \right)^4 \right] \pm h_{t2}(T_2 - T_{a2}) \\ & = h_{dış}(T_{2(x)} - T_e) + \varepsilon_1 \sigma \left[ \left( \frac{T_2 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{dış} + 273}{100} \right)^4 \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$h_{t1}(T_1 - T_{a1})b = cm_1 \frac{dT_{a1}}{dx} \quad (5)$$

$$h_{t2}(T_2 - T_{a2})b = \dot{m}_2 \frac{dT_{a2}}{dX} \quad (6)$$

$$Lg(\rho_{iç} - \rho_{kanal}) = \left( \Sigma\xi + \lambda \frac{L}{D_h} \right) \frac{v_{kanal}^2}{2} \rho_{kanal} \quad (7)$$

Masif duvar kısmına absorber plaka ilave edilen Trombe duvarı tasarımı için Duan ve ark.'nın kullandığı matematiksel model ele alınmıştır [5]. 8-12 numaralı denklemlerde zamana bağlı değişim olmadığı kabulü yapılmıştır. Bu denklemlerdeki semboller ve indisler 1-7 denklemlerdekiyle aynıdır. A sembolü yüzey alanını (m<sup>2</sup>), d sembolü kalınlığı (m), U sembolü toplam ısı transfer katsayısını (W/m<sup>2</sup>°C), k sembolü iletimle olan ısı transfer katsayısını (W/m°C), z simgesi ise soğurganlık değerini göstermektedir.

$$h_{dış,ortam}A_{cam}(T_{cam,1} - T_{hava}) + h_{r,cam-dış\ ortam}A_{cam}(T_{cam,1} - T_{hava}) + \frac{k_{cam}}{d_{cam}}A_{cam}(T_{cam,1} - T_{cam,2}) = z_{cam}A_{cam}Q_{güneş} \quad (8)$$

$$\left( h_{r,cam-dış\ ortam} + \frac{k_{cam}}{d_{cam}} \right) A_{cam}(T_{cam,2} - T_{duvar}) + \frac{k_{cam}}{d_{cam}} A_{sır}(T_{cam,2} - T_{cam,1}) = 0 \quad (9)$$

$$h_{t,plaka}A_{plaka}(T_{plaka} - T_{hava}) + \left( h_{r,plaka-cam} + \frac{k_{hava-plaka}}{d_{plaka-hava}} \right) A_{plaka}(T_{plaka} - T_{cam,2}) + U_{plaka}A_{plaka}(T_{plaka} - T_{iç}) + h_{r,plaka-duvar}A_{plaka}(T_{plaka} - T_{duvar}) = z_{plaka}z_{cam}A_{plaka}Q_{güneş} \quad (10)$$

$$h_{t,plaka}A_{plaka}(T_{plaka} - T_{hava}) + h_{t,cam}A_{cam}(T_{cam,2} - T_{hava}) + h_{t,duvar}A_{duvar}(T_{duvar} - T_{hava}) = \rho_{hava}\dot{V}C_p(T_{dış} - T_{iç}) \quad (11)$$

$$U_{plaka} = \frac{1}{\frac{d_{duvar}}{k_{duvar}} + \frac{1}{h_{iç}}} \quad (12)$$

Oda içi sıcaklığının zamana bağlı değişimini hesaplayabilmek içinse aşağıdaki denklemden yararlanılabilir. Buradaki "t" zamanı göstermektedir.

$$T_{oda} - T_{oda}^i = \frac{Q}{c\rho V_{oda}} t \quad (13)$$

## B. Ekonomik Analiz

Küresel ölçekte ortaya çıkan güncel gelişmeler sebebiyle enerji girdilerinin maliyeti artış eğilimi göstermektedir, bunun yanı sıra enerji arzındaki sürekliliğin de kesintiye uğraması gibi olası olumsuz senaryolar da beklenmektedir. Bu bağlamda yenilenebilir ve dışa bağımlı olmayan kaynaklarla çalışabilen bir sistemin ekonomik anlamda da incelenmesi önem taşımaktadır.

İncelenen Trombe duvarı sistemlerinin ekonomik analizi ısıtma koşulları için yapılmıştır ve ısıtma periyodu olarak 15 Kasım ile 15 Nisan arası seçilmiştir ve yaz mevsiminde sistemin etkili bir gölgelendirmeye birlikte fazladan bir soğutma yükü getirmediği varsayımı yapılmıştır. Ekonomik analiz esnasında gerekli olan çevre sıcaklığı, toplam ışınım miktarı gibi değerler incelenen zaman periyodu için Avrupa Birliği'ne bağlı ilgili birimin sunduğu verilerden alınmıştır [34]. Ekonomik analiz esnasında sistemin çalışma döngüsündeki anapara tasarrufu ve bu tip bir duvarın üretilmesinin ne kadar sürede kendini amorti edeceğini hesaplanmıştır.

Anapara tasarrufu için S simgesi seçilmiştir ve birimi TL'dir. Hesaplaması içinse kullanılan formül aşağıdaki gibi verilmiştir [35]. S değeri sıfırdan büyük oldukça Trombe duvarı uygulamasının ekonomik açıdan avantajlı olduğunu söylenebilir.

$$S = \dot{I}O * (Q_{tasarruf} * Y\ddot{U} - F * BMK) - F \quad (14)$$

Formülde  $Y\ddot{U}$ , yakıt ücretini temsil etmektedir. Analizde yakıt olarak doğalgaz seçilmiştir ve yakıt ücretinin birimi TL/kJ olarak alınmıştır. F, Trombe duvarı imalatı için gerekli olan sermaye girdisini gösterir, birimi TL/m<sup>2</sup>'dir.  $\dot{I}O$  ise indirim oranını göstermektedir, hesaplanması şu şekilde gösterilmiştir [35].

$$\dot{I}O = \frac{1}{d - e} * \left[ 1 - \left( \frac{1 + e}{1 + d} \right)^{\dot{C}D} \right] \quad (15)$$

15 numaralı formüldeki “d” kredi faizini, “e” yakıt ücretinin yıllık artış oranını,  $\dot{C}D$  ise sistemin çalışma döngüsünün yıl sayısını göstermektedir  $\dot{C}D$  değeri literatürde 20-50 yıl arası olarak verilmektedir, bu analizde ise ek maliyet gerektirecek herhangi bir tadilat işlemi gerektirmeyecek ortalama bir yapı ömrü olması açısından 30 yıl olarak seçilmiştir

14 numaralı formüldeki “BMK” bakım maliyet katsayısını göstermektedir. Hesaplanması için aşağıda gösterilen formül kullanılabilir [35].

$$BMK = \frac{Y\ddot{U}'}{ID * IV} \quad (16)$$

$Y\ddot{U}'$  incelenen sistem için doğalgazın ücretidir, birimi TL/m<sup>3</sup> dür. ID ısı değeri gösterir, doğalgaz için 8250 kcal/m<sup>3</sup> değerindedir. IV ise incelenen yakıt için kullanılan kazanın ısı verimini gösterir ve doğalgaz kazanı için 0,92 alınmıştır [36].

Trombe duvarı sisteminin kendini ne kadar sürede amorti edeceğini belirlemek içinse 17 numaralı denklem kullanılabilir. Bu denklemdeki  $\dot{I}O$  değeri ise 14 numaralı denklemde S değerinin sifıra eşitlenmesi ile bulunur. Amorti süresi AS ile gösterilirse denklem aşağıdaki gibi yazılabilir [35].

$$AS = \frac{\ln[1 - \dot{I}O * (d - e)]}{\ln\left(\frac{1+e}{1+d}\right)} \quad (17)$$

### C. Çevresel Analiz

Trombe duvarının çevresel analizinde, sistemin kullanılmasıyla birlikte CO<sub>2</sub> salımının ne kadar düştüğü hesaplanmaktadır. Salım düşüşü SD ile gösterilirse, bu değer kg cinsinden aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanabilir, formüldeki  $F_{CO_2}$ , karbon salım faktörü olup yakıtın cinsine göre değişmektedir ve doğalgaz için 0,404 olarak alınır [35].

$$SD = \frac{Q_{tasarruf} * \dot{C}D}{ID * IV} * F_{CO_2} * \frac{44}{12} \quad (18)$$

## III. BULGULAR

### A. Enerji Analizi

Trombe duvarı için hesaplamalarda kullanılan modellerden elde edilen iç ortam sıcaklığı değişiminin sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu karşılaştırma zamana bağlı değişim formülü göz önüne alınarak yapılmıştır. Deneysel verilerle karşılaştırma yapabilmek için ele alınan modeller deneylerin yapıldığı coğrafik şartlardaki ve geometrideki odaya uyarlanmıştır [37]. Deneyin gerçekleştirildiği yer ve oda ile ilgili veriler Tablo 4'te verilmiştir.

**Tablo 4.** Model ve deney karşılaştırılmasında kullanılan oda ile ilgili bilgiler

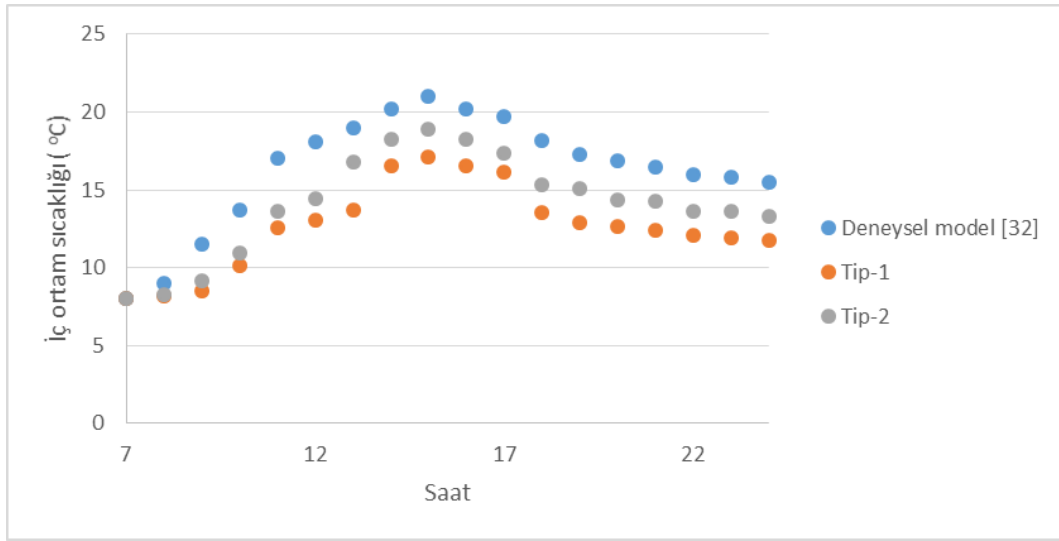
Enlem – Boylam –Konum	31°C53'50"/K - 54°C 22'3"/D – Yazd, İran
Test odası boyutları (m)	3x2x3
Masif duvar kalınlığı (m)	0,20
Masif duvar genişliği (m)	1
Hava boşluğu genişliği (m)	0,3
Havalandırma kanalı (m x m)	0,3 x 0,5
Deneyin gerçekleştirildiği tarih	6 Şubat 2014

Model ve deney sonuçları ile edilen oda sıcaklıkları arasındaki uyum ise Tablo 5’te sunulmaktadır. İncelenen zaman periyodundaki sıcaklık değerlerinin ortalamasından yararlanılarak ortalama bağıl ve yüzde hataları hesaplanmıştır.

**Tablo 5.** Model ve deney sonuçları arasındaki hata oranları

Duvar tipi	Ortalama Bağıl Hata	Ortalama Yüzde Hata
Tip-1	0,223	%22,4
Tip-2	0,156	%15,6

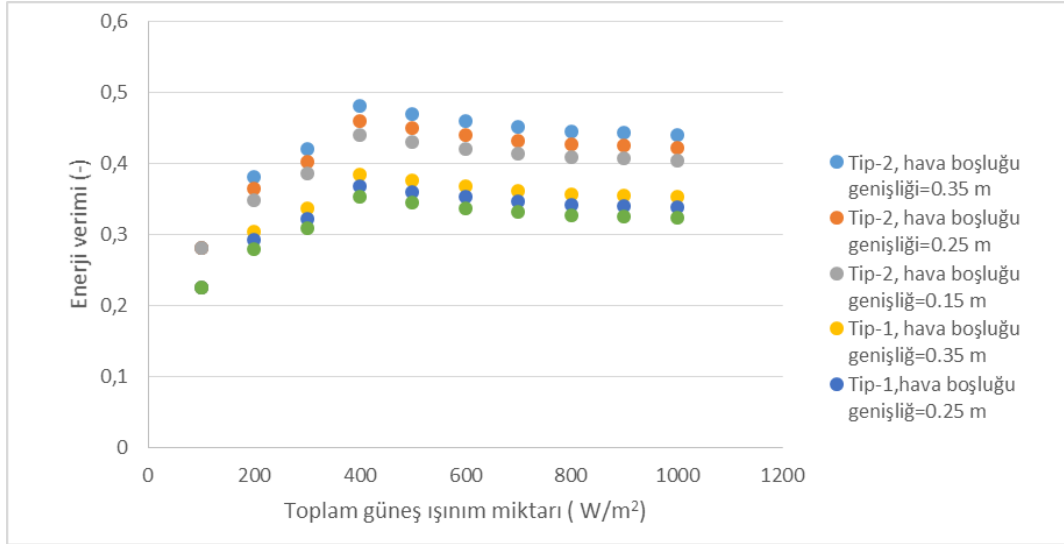
Bu hata değerlerinin oluşmasında deney şartlarındaki ısı taşınım katsayısı gibi değerlerin modelde kullanılan değerlerden farklı olmasının etkin olduğu söylenebilir. Tip-2 duvarın deney sonuçlarıyla daha uyumlu olmasının sebebi ise deneyde inşa edilen duvarın yapısının Tip-2’deki duvarın yapısına daha yakın olmasıdır. Ayrıca her iki duvar tipi için de sıcaklık değerinin saate bağlı değişimi deneysel sonuçtaki değişimle uyumludur.



**Şekil 3.** Deneysel sonuçlar ve Tip-1 Tip-2 model karşılaştırması

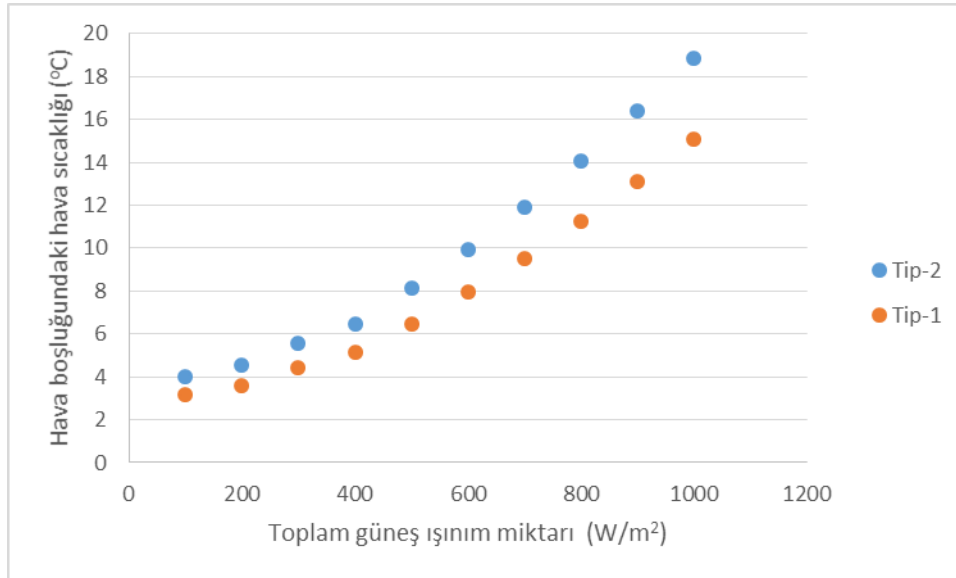
Şekil 4’ ten görülebileceği gibi kararlı hal koşullarında enerji verimliliği her iki tipteki duvar için de hava boşluğu genişliğinin artmasıyla artmaktadır. Bu hesaplama için enerji verimliliği, güneşten gelen ısı enerjisinin odanın sıcaklığını arttıran ısı enerjisiye olan oranı olarak tanımlanmıştır. Bu grafik çizilirken toplam güneş ışınım miktarı ve hava boşluğu genişliği değerleri değiştirilmiştir. Kanal derinlik değerleri olarak 0,15, 0,25 ve 0,35 metre alınmıştır. Hava boşluğu genişliği arttıkça kesit alanı da artar, bu artış doğrultusunda kaldırma kuvvetleri sürtünme kuvvetlerinden baskın olmaya başlar ve boşluk içindeki kütleli debi artar. Kütleli debinin artmasıyla hava hızında ve ısı transfer hızında artış gözlemlenir bu da hava ile duvar arasındaki taşınım yoluyla olan ısı transferi miktarında iyileşme sağlar. Bunun sonucunda da enerji verimliliği ve hava çıkış sıcaklığı yükselir. İncelenen aralık içerisinde en yüksek enerji verimi değerine güneş enerjisi yoğunluğu 500 W/m<sup>2</sup> ve kanal derinliği 0,35metre iken ulaşılmıştır. Enerji verimleri Tip-1 ve Tip-2 duvarlar için sırasıyla 0,37 ve 0,46 olarak elde edilmiştir.



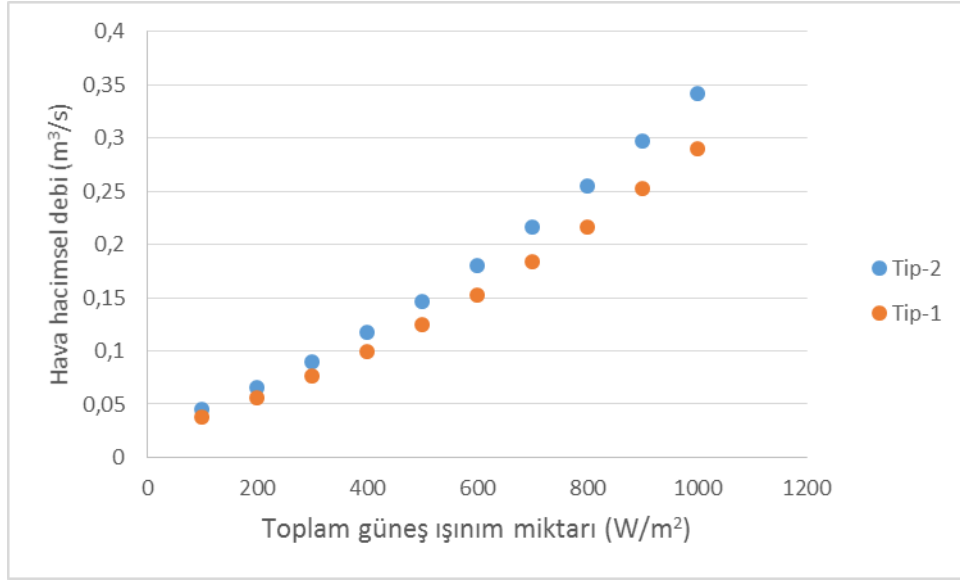


Şekil 4. Enerji veriminin hava boşluğu genişliği ve toplam güneş ışınım miktarı ile değişimi

Şekil 5 ve 6 'da kararlı hal koşulları geçerliken toplam güneş ışınım miktarı değişimi ile hava kütleli debisinin ve çıkış sıcaklığının değişimi gösterilmiştir. Grafiklerde gösterilen hesaplamalar yapılırken hava boşluğunun genişliği 0,35 metre olarak sabit tutulmuştur. Toplam güneş ışınım miktarı arttıkça hem kütleli debi hem de çıkış sıcaklığı artmaktadır, bunun sebebi de artan ışınım miktarı ile birlikte taşınım yoluyla olan ısı transfer miktarında olan iyileşmedir.

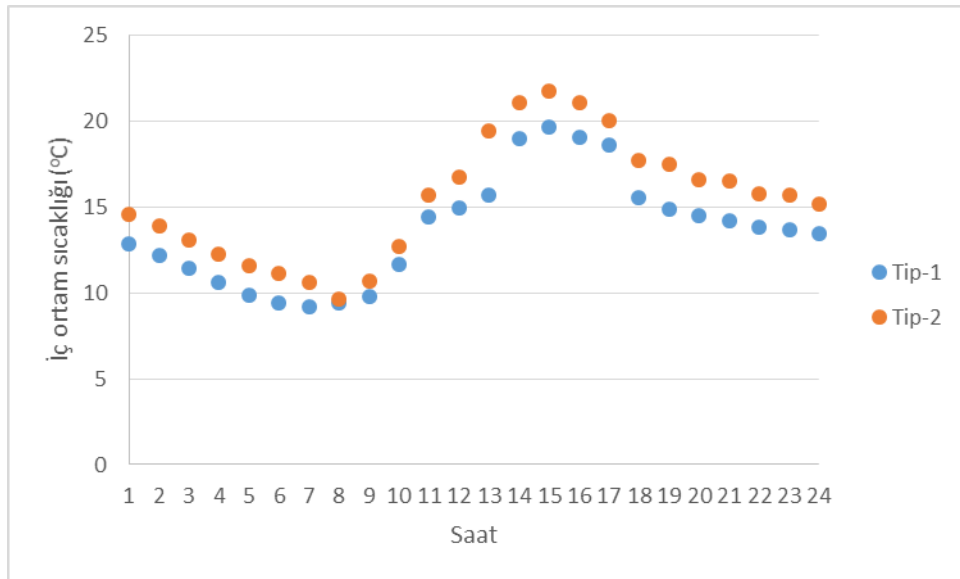


Şekil 5. Hava boşluğundaki sıcaklığın toplam güneş ışınım miktarı ile değişimi



Şekil 6. Hava hacimsel debisinin toplam güneş ışınım miktarı ile değişimi

Oda sıcaklığının gün içindeki saatlik değişimi Şekil 7' de verilmiştir. Hesaplama yapılırken 20 Ocak 2020 günü ele alınmış ve hava boşluğu genişliği 0,35 metre olarak sabit alınmıştır. Şekilde 01.00 ile 24.00 saatleri arasında saatlik değişim şeklinde bir gösterim sunulmuştur. Grafığe göre saat 15'de oda sıcaklıkları Tip-2 ve Tip-1 duvarlar için sırasıyla 21,8 ve 19,6 °C'lik maksimum değerlerine ulaşır ve daha sonra azalma eğilimi gözükür, bu azalmanın değeri ve hızı 01.00-08.00 arası gözlenen azalmaya göre daha düşüktür. Bunun sebebi ise Trombe duvarında depolanan ısının güneş etkisi geçtikten sonra üzerindeki ısı yükü yavaş yavaş bırakmasıdır. Trombe duvarında depolanan ısı yükü azaldıktan sonra odanın sıcaklığındaki düşüş hızı artmaktadır



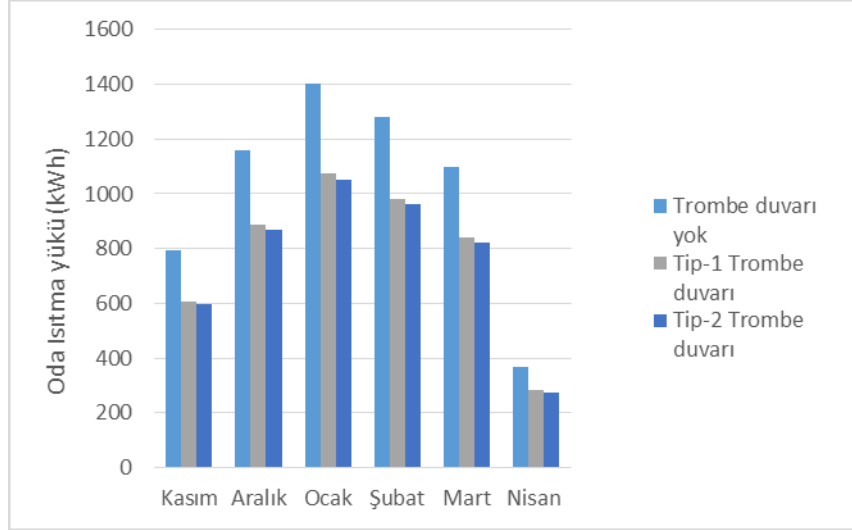
Şekil 7. Oda sıcaklığının zamana bağlı değişimi

### B. Ekonomik Analiz

Bölüm 2.2'deki ekonomik analiz formülleri kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen sonuçlar Tablo 6'da sunulmuştur. Şekil 8'de ise incelenen odanın analiz yapılan zaman aralığındaki ısı yükleri hem Trombe duvarı yokken hem de Tip-1 ve Tip-2 Trombe duvarları varken gösterilmiştir.

Tablo 6. Ekonomik Analiz Sonuçları

	Q <sub>tasarruf</sub> (kWh)	Yıllık Tasarruf (%)	S ( TL)	AS (yıl)
Tip-1	1425	23,3	12780	7,3
Tip-2	1525	24,9	13550	6,9



Şekil 8. Oda ısıtma yükünün değişimi

Analizin yapıldığı sıradaki enerji maliyetlerine göre iki tipteki duvarın da yaklaşık yedi yıl içerisinde kendini amorti edeceği görülmüştür. Tip-2 duvar genel enerji verimliliği bakımından Tip-1'e göre daha yüksek değere sahip olduğu için de amorti süresi daha kısa olmuştur

### C. Çevresel Analiz

Bölüm 2.3 kısmında verilen çevresel analiz formülüne göre yapılan hesaplamalar ile CO<sub>2</sub> salımında Tip-1 Trombe duvarı için toplam 5985,5 kg ve Tip-2 Trombe duvarı için toplam 6405,5 kg azalma bulunmuştur. Bu değerler de günümüzde çok ciddi bir sorun olan küresel ısınmanın olumsuz etkilerini azaltma konusunda önemli bir adım teşkil etmektedir.

## IV. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında pasif ısıtma uygulaması ile enerji tasarrufu yapılabilmesi için kullanılan alternatiflerden biri olan Trombe duvarı sisteminin Manisa ilinde kış mevsiminde uygunluğu araştırılmıştır. Trombe duvarı olarak klasik tip ve absorber plakalı tip olarak iki alternatif ele alınmıştır. Trombe duvarının verimi üzerinde birçok farklı parametrenin etkisi söz konusudur, bu makalenin içeriğinde toplam güneş ışınım miktarının değişimi ve hava boşluğu genişliğinin değişimi ele alınmıştır. İlerdeki çalışmalar için duvar malzemesinin değişimi, duvar kalınlığının değişimi, absorber plaka malzemesinin değişimi gibi parametreler de alternatif olarak incelenebilir.

Farklı güneş ışınım yoğunlukları ve hava boşluğu genişliği alternatiflerinde sırasıyla 500 W/m<sup>2</sup> ve 0,35 m değerleri için Trombe duvarı veriminin %46'ya ulaştığı görülmüştür. Bu değerler için de ısıtılması istenen iç ortamın sıcaklığının 21,8 °C olduğu görülmüştür. Hesaplamaların sonucuna göre iç ortamın sıcaklığının uzun süre muhafaza edilebildiği görülmüştür. Bu sonuç ortam ısıtmasında doğalgaz, kömür veya elektrik gibi fosil kaynaklara bağımlılığın azalacağını söylemektedir, bu sayede ısıtma maliyetlerinde teorik olarak %24'lük bir tasarruf da öngörülmektedir. Fosil yakıtla ısıtılan ortamlarda otomasyon eşliğinde kullanılan açılır kapanır havalandırma kanallı Trombe duvarı uygulamalarının enerji tasarrufuna olan etkisinin deneysel olarak incelenmesi de ayrı bir çalışma konusu olabilir.

Trombe duvarının uygulanmasının yalnızca enerji verimliliği açısından değil aynı zamanda ekonomik ve çevresel açılardan da bir katma değer yaratmaktadır. Her iki tipteki duvar için de sistemin amorti süreleri sistemin çalışma dönemi göz önüne alındığında oldukça düşüktür. Bu durum bu tip sistemlerin ekonomik açıdan da avantajlı olduğunu göstermektedir. Çevresel analiz sonucunda elde edilen değerler de bu sistemlerin karbon salımını azaltıcı ve de dolayısıyla sera etkisini azaltıcı yönde etkisi olduğunu göstermektedir. Bu sebeple incelenen

üç farklı analiz açısından da Trombe duvarları yalnızca bugüne dair değil geleceğe yönelik de bir yatırım olarak düşünülebilir.

Trombe duvarında karşılaşılan sorunlardan en önemlilerinden birisi ise iç ortam sıcaklığının ilkbahar ve yaz mevsimlerinde konfor sınırının üzerindeki değerlere çıkmasıdır. Bu durumun önüne geçmek için tasarımda farklı gölgelendirme sistemlerinin uygulanması, havalandırma kanallarının konumlandırılması gibi değişiklikler yapılabilir ve bu yapılan değişikliklerin etkisi yaz mevsimi için analiz edilebilir. Ayrıca tüm bu değişimler mümkünse deneysel çalışmalarla desteklenebilir.

#### KAYNAKLAR

- [1] IEA World. Energy outlook special report (2015): *energy and climate change*. France: OECD/IEA; 2015. (2015). IEA World. Energy outlook special report 2015: *energy and climate change*. France: OECD/IEA; 2015. <https://doi.org/10.1016/B978-008044910-4.00561-7>
- [2] Sergei, K., Shen, C., & Jiang, Y. (2020). A review of the current work potential of a trombe wall. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130(October 2019) . <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109947>
- [3] Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N., & Gekas, V. (2005). Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy Policy*, 33(3), 289–296. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00241-6](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00241-6)
- [4] Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A., & Kim, K. H. (2018). Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 894–900. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.09.094>
- [5] Duan, S., Jing, C., & 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>
- [6] Review, B., & Koehler, K. (2014). The Solar House: Pioneering Sustainable Design. By Anthony Denzer. New York: Rizzoli, 2013. *Arts 2014*, Vol. 3, Pages 303-306, 3(3), 303–306. <https://doi.org/10.3390/ARTS3030303>
- [7] Hu, Z., He, W., Ji, J., & 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>
- [8] Saadatian, O., Sopian, K., Lim, C. H., Asim, N., & Sulaiman, M. Y. (2012). Trombe walls: A review of opportunities and challenges in research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 6340–6351. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2012.06.032>
- [9] Randjelovic, D., Vasov, M., Ignjatovic, M., Bogdanovic-Protic, I., & Kostic, D. (2018). Impact of trombe wall construction on thermal comfort and building energy consumption. *Facta Universitatis - Series: Architecture and Civil Engineering*, 16(2), 279–292. <https://doi.org/10.2298/fuace180302008r>
- [10] Hernández-López, I., Xamán, J., Chávez, Y., Hernández-Pérez, I., & Alvarado-Juárez, R. (2016). Thermal energy storage and losses in a room-Trombe wall system located in Mexico. *Energy*, 109, 512–524. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2016.04.122>
- [11] Modulated Facade System: Trombe Wall And Glazing Study For Different Portuguese Climates Sistema De Fachada Modular: Estudos De Muro Trombe Y Doble | Semantic Scholar. (n.d.). Retrieved March 1, 2022, from <https://www.semanticscholar.org/paper/Modulated-Facade-System%3A-Trombe-Wall-And-Glazing-De-Diferentes-Portugueses/5b595045b56103372e1767a0573514b5acac1880>
- [12] Stazi, F., Mastrucci, A., & Di Perna, C. (2012). The behaviour of solar walls in residential buildings with different insulation levels: An experimental and numerical study. *Energy and Buildings*, 47, 217–229. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2011.11.039>
- [13] Stazi, F., Mastrucci, A., & Munafò, P. (2012). Life cycle assessment approach for the optimization of sustainable building envelopes: An application on solar wall systems. *Building and Environment*, 58, 278–288. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2012.08.003>
- [14] Zalewski, L., Lassue, S., Duthoit, B., & Butez, M. (2002). Study of solar walls — validating a simulation model. *Building and Environment*, 37(1), 109–121. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00072-X](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00072-X)
- [15] Błotny, J., & Nem's, M. N. (2019). Analysis of the Impact of the Construction of a Trombe Wall on the Thermal Comfort in a Building Located in Wrocław, Poland. <https://doi.org/10.3390/atmos10120761>
- [16] Olenets, M., Piotrowski, J. Z., & 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>
- [17] Bojić, M., Johannes, K., & 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>
- [18] Briga Sá, A., Boaventura-Cunha, J., Lanzinha, J. C., & Paiva, A. (2017). An experimental analysis of the Trombe wall temperature fluctuations for high range climate conditions: Influence of ventilation openings and shading devices. *Energy and Buildings*, 138, 546–558. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.085>
- [19] Dabaieh, M., & Elbably, A. (2015). Ventilated Trombe wall as a passive solar heating and cooling retrofitting approach; a low-tech design for off-grid settlements in semi-arid climates. *Solar Energy*, 122, 820–833. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2015.10.005>

- [20] Özbalta, T. G., & Kartal, S. (2010). Heat gain through Trombe wall using solar energy in a cold region of Turkey. *Scientific Research and Essays*, 5(18), 2768–2778. Retrieved from <http://www.academicjournals.org/SRE>
- [21] Abbassi, F., Dimassi, N., & Dehmani, L. (2014). Energetic study of a Trombe wall system under different Tunisian building configurations. *Energy and Buildings*, 80, 302–308. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2014.05.036>
- [22] Hami, K., Draoui, B., & Hami, O. (2012). The thermal performances of a solar wall. *Energy*, 39(1), 11–6. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2011.10.017>
- [23] Fiorito, F. (2012). Trombe Walls for Lightweight Buildings in Temperate and Hot Climates. Exploring the Use of Phase-change Materials for Performances Improvement. *Energy Procedia*, 30, 1110–1119. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2012.11.124>
- [24] Zalewski, L., Chantant, M., Lassue, S., & Duthoit, B. (1997). Experimental thermal study of a solar wall of composite type. *Energy and Buildings*, 25(1), 7–18. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)00974-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)00974-7)
- [25] Liu, Yanfeng, Wang, D., Ma, C., & Liu, J. (2013). A numerical and experimental analysis of the air vent management and heat storage characteristics of a trombe wall. *Solar Energy*, 91, 1–10. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2013.01.016>
- [26] Kaya, E. S., Aksel, M., Yigit, S., & Acikara, T. (2021). A numerical study on the effect of vent/wall area ratio on Trombe wall thermal performance. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, 174(5), 224–234. <https://doi.org/10.1680/jensu.20.00064>
- [27] Bellos, E., Tzivanidis, C., Zisopoulou, E., Mitsopoulos, G., & Antonopoulos, K. A. (2016). An innovative Trombe wall as a passive heating system for a building in Athens—A comparison with the conventional Trombe wall and the insulated wall. *Energy and Buildings*, 133, 754–769. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.035>
- [28] Guarino, F., Athienitis, A., Cellura, M., & Bastien, D. (2017). PCM thermal storage design in buildings: Experimental studies and applications to solarium in cold climates. *Applied Energy*, 185, 95–106. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2016.10.046>
- [29] Chow, T. T., Hand, J. W., & Strachan, P. A. (2003). Building-integrated photovoltaic and thermal applications in a subtropical hotel building. *Applied Thermal Engineering*, 23(16), 2035–2049. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00183-2](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00183-2)
- [30] Liu, Yiwei, & Feng, W. (2012). Integrating Passive Cooling and Solar Techniques into the Existing Building in South China. *Advanced Materials Research*, 368–373, 3717–3720. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.368-373.3717>
- [31] Tunç, M., & Uysal, M. (1991). Passive solar heating of buildings using a fluidized bed plus Trombe wall system. *Applied Energy*, 38(3), 199–213. [https://doi.org/10.1016/0306-2619\(91\)90033-T](https://doi.org/10.1016/0306-2619(91)90033-T)
- [32] Global Solar Atlas. (n.d.). Retrieved March 2, 2022, from <https://globalsolaratlas.info/map?c=38.612579,27.433397,11&s=38.612579,27.433397&m=site>
- [33] Piotrowski, J. Z., Stroy, A., & Olenets, M. (2013). Mathematical modelling of the steady state heat transfer processes in the convectional elements of passive solar heating systems. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 13(3), 394–400. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2013.02.002>
- [34] JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission. (n.d.). Retrieved December 25, 2022, from [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/#HR](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#HR)
- [35] Zhang, H., & Shu, H. (2019). A Comprehensive Evaluation on Energy, Economic and Environmental Performance of the Trombe Wall during the Heating Season. *Journal of Thermal Science*, 28(6), 1141–1149. <https://doi.org/10.1007/s11630-019-1176-7>
- [36] Kanoğlu, M., & Üniversitesi, G. (n.d.). Enerji Verimliliği Örnek Projeleri.
- [37] Rabani, M., Kalantar, V., Dehghan, A. A., & Faghieh, A. K. (2015). Experimental study of the heating performance of a Trombe wall with a new design. *Solar Energy*, 118, 359–374. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.06.002>