

Farklı Duvar Modellerinde Isı Yalıtımının Etkisinin İncelenmesi

Mehmet Kan^{1*}, Murat Kuru²

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye.

²Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye.

*mehmetkan@sdu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, ısı kaybını belirlemek amacıyla farklı duvar modelleri tasarlanmıştır. Bu amaçla klasik duvar, cam yünlü yalıtımlı duvar, taş yünlü yalıtımlı duvar, tromble duvar ve faz değiştiren malzemeli (FDMli) tromble duvar olmak üzere 5 farklı duvar termal davranışları irdelenmiştir. İlk olarak 2 cm iç sıva, 18,5 cm tuğla ve 2 cm dış sıvadan oluşan yalıtımsız klasik duvar modeli ve daha sonra 5 cm taş yünü ve cam yünü yalıtım malzemeli duvar modelleri için analizler yapılmıştır. Son olarak tromble duvar model uygulaması incelenmiş olup tromble duvar modeline FDM eklenerek ısı yalıtımına etkisi incelenmiştir. 3. bölgede yer alan Isparta iline ait iç ve dış ortam sıcaklıkları belirlenmiştir. Isparta için ocak ayı verilerine göre iç ortam sıcaklığı 22 °C ve dış ortam sıcaklığı -1°C olduğu hesaplanmıştır. Bu duvar modelleri için yapılan analizlerden elde edilen sıcaklık ve ısı akısı verileri karşılaştırılmıştır. Analizler sonucunda iç ortam duvar sıcaklığı FDMli tromble duvar modeli analizler sonucunda daha iyi sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: FDM, Tromble duvar, Isı yalıtımı, HAD.

Investigation of the Effect for Thermal Insulation on Different Wall Models

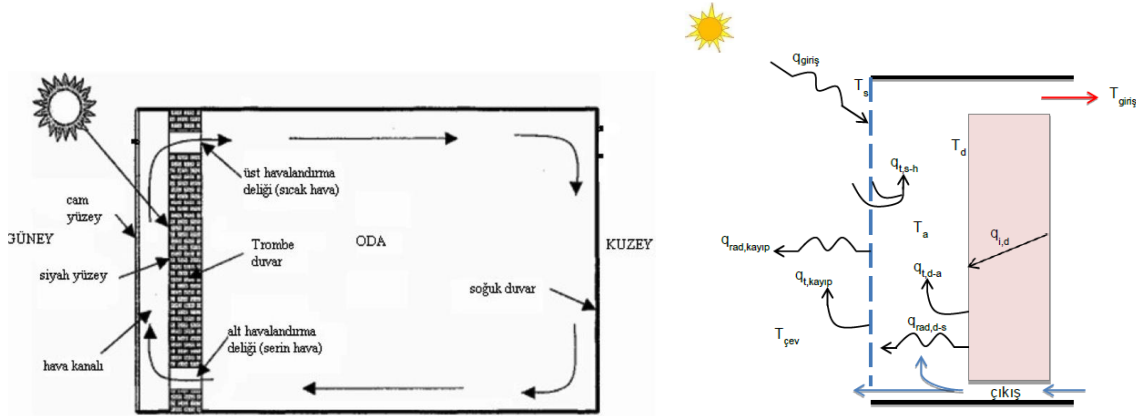
Abstract

In this study, different wall models were designed to determine the heat loss. For this purpose, the thermal behavior of 5 different walls, namely the classical wall, the wall insulated with glass wool, the wall insulated with rock wool, the tromble wall and the tromble wall made of phase change material (FDM), was studied. First, analyzes were performed for the classic uninsulated wall model consisting of 2 cm interior plaster, 18.5 cm brick and 2 cm exterior plaster, and then for the wall models with 5 cm rock wool and glass wool insulation materials. Finally, the application of the tromble wall model was investigated and the effect on thermal insulation of adding FDM to the tromble wall model was studied. The indoor and outdoor temperatures of Isparta province, which is located in the 3rd region, were obtained. According to the January data for Isparta, the indoor temperature is 22 °C and the outdoor temperature is -1 °C. The temperature and heat flux data obtained from the analyzes for these wall models were compared. As a result of the analysis, it was found that the analysis of the internal temperature of the wall, the tromble wall model with FDM, gave better results.

Keywords: FDM, Trombe wall, Thermal insulation, CFD.

1. GİRİŞ

Güneş enerjisi, doğal enerji kaynakları insan yaşamını kolaylaştıran önemli bir enerji kaynağıdır. Güneş enerjisi kullanılarak binaların ısıtma ve soğutma ihtiyacı sıcak su elde edilmesi gibi avantajları sahip ve kolaylıkla temin edilebilmektedir. Güneş enerjisi, günümüz uygulamalarında aktif, pasif ya da her ikisinin birleşimini içeren yöntemlerle kullanılmaktadır. Aktif yöntemde; sisteme ek bir enerji vererek (fan, pompa gibi) enerji sağlanır. Bu yöntemler genelde kolektör sistemlerinde kullanılır. Pasif yöntemde ise sisteme herhangi bir ek enerji verilmeden yalnızca doğal yollarla enerji transferi sağlanır. Pasif ısıtma, güneş ışınımını toplama mekanizmalarına bağlı olarak farklılık gösterir. Pasif güneş enerji sistemlerinde kullanılan ısıtma ve soğutma işlemleri, radyasyon, kondüksiyon ve doğal konveksiyondan oluşmaktadır. Güneş ışığı binaya çarptığı zaman, bina malzemeleri bu ışığı geçirir, yansıtır ya da güneş ışınımını absorbe eder. Binaların ısıtılması, doğal bir enerji kaynağı olan güneş vasıtasıyla yapılabilmektedir. Pasif ısıtma tekniklerinden biri de Trombe duvar kullanımınıdır [1]. Şekil 1’de Trombe duvar çalışma prensibi ve ısı transfer mekanizması gösterilmiştir. Trombe duvar bir kolektör sistemi olup, duvar ve duvardan belli bir mesafeye yerleştirilmiş cam yüzeyden oluşur. Duvarın dış yüzeyi güneşe bakar ve güneş ışınlarını absorplayıcı olarak çalışır. Burada, camdan geçen ışınlar, Trombe duvar tarafından emilerek, enerji duvar içinde depolanır. Cam ile duvar arasında kalan hava ise ısınır ve doğal konveksiyon yoluyla üst delikten iç ortama iletilir. Bilindiği gibi ısınan hava genişler ve böylece sıcaklığı artarken yoğunluğu azalır. Dolayısı ile kanal içerisindeki hava, kaldırma kuvvetinin etkisiyle yükselir. Üst delikten oda içerisine girerek, sahip olduğu enerjiyi buralara aktarır. Soğuk oda havası, Trombe duvarın alt kısmında bulunan hava deliğinden kanala çekilir, hava kanalında ısınarak yükselir ve oda içerisine tekrar sirkülasyon yoluyla aktarılır. Kanalda doğal konveksiyonla ısının taşınması, duvarın alt ve üst kısımlarına hava deliklerinin açılmasıyla mümkün olmaktadır. Böylece kışın güneşli günlerde odaya ek bir ısı kazancı sağlanmış olur. Trombe duvar sistemlerinde duvarın güneşe bakan dış yüzeyi koyu renkte olmalıdır. Ayrıca trombe duvarın için ısı transfer modeli gösterilmiştir. Bu modelde ısı transferi radyasyon, kondüksiyon ve doğal konveksiyon olmak üzere üç faktörden oluşmaktadır [2].



Şekil 1. Trombe duvar çalışma prensibi ve ısı transfer mekanizması [1,2]

Literatürde binalarda yalıtım malzemesi trombe duvar ve FDMlerin duvar modellerinde kullanımına yönelik farklı çalışmalar bulunmaktadır. Uçar ve Balo çalışmalarında farklı iklim bölgeleri için optimum yalıtım kalınlıklarını ve yatırım maliyetlerini incelemişlerdir. Bölge ve yalıtım malzemesine bağlı olarak enerji tasarrufunun değiştiği gözlemlemişlerdir [3]. Yu vd., yaptıkları çalışmada Çin’in farklı bölgelerinde yaz ve kış mevsimleri için optimum yalıtım kalınlıklarının belirlenmesinde farklı yalıtım malzemelerini karşılaştırmışlardır. [4]. Gölcü vd. dış

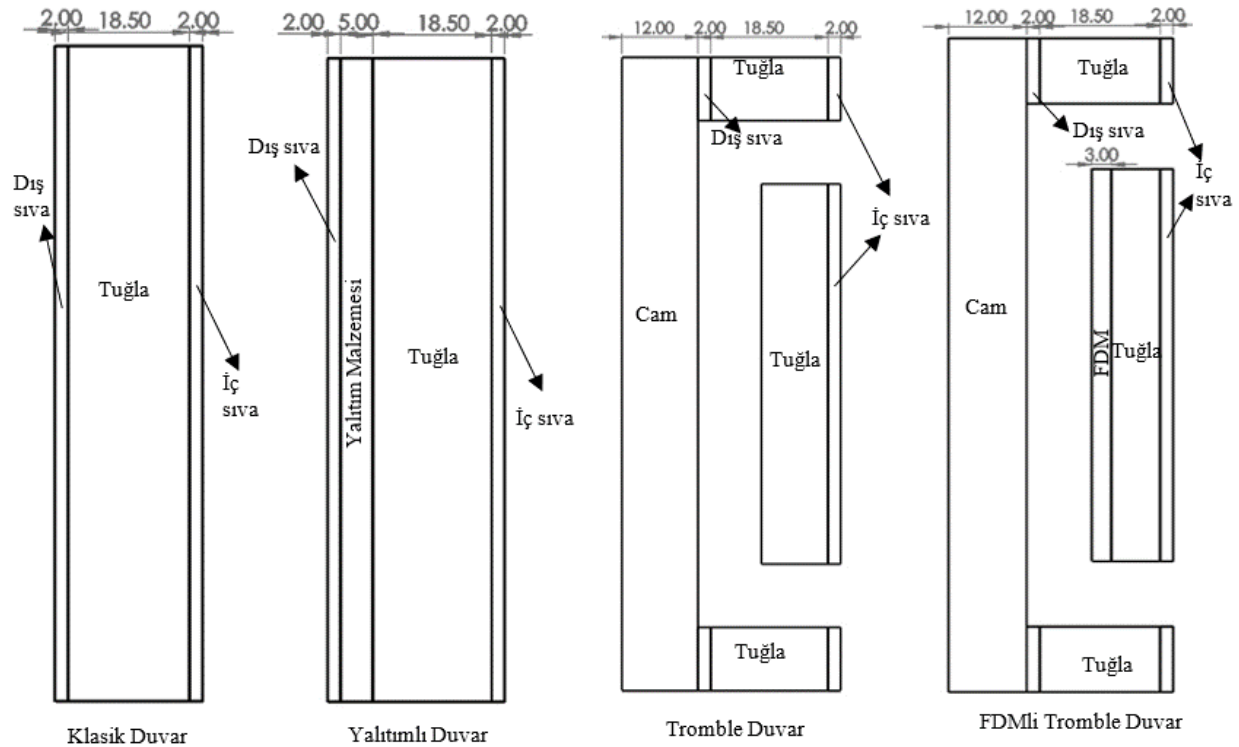
duvar modelinde taş yünü yalıtım malzemesi olarak kullanmışlardır. Bu bina duvarı için optimum yalıtım kalınlıklarını, enerji tasarruflarını ve geri ödeme sürelerini hesaplamışlardır [5]. Liu vd., çalışmalarında yıllık enerji tüketimini tahmin etmek için nem transferinin ısı transferine olan etkisini dikkate alan birleştirilmiş ısı ve nem transferi modeli kullanmışlardır [6]. Zalewski vd., yaptıkları çalışmada yalıtımlı büyük bir tromble tasarlamışlardır. Bir prototip Trombe duvarlı sistem test hücresi içine inşa edilerek iki yıl boyunca test edilmiştir. Büyük duvarın ısıl fiziksel özellikleri ve bina ile havalandırılmış tabakadaki ısı transferi miktarı hesaplamışlardır [7]. Pieter çalışmasında, bina tasarımı ve yapılanma simülasyon araçlarının bütünleştirilmesini incelemiştir. Bir bina dizaynı içerisinde tromble duvarın, geliştirilmiş cam sistemleri ve fotovoltaikler elemanların etkisini gözlemleyerek enerji maliyet analizi yapılmıştır [8]. Khedari vd., bir bina içerisinde 25 m³ hacme sahip bir odadaki güneş bacasının performansını incelemiştir. Güneş bacasız bir ev ile güneş bacalı bir ev arasındaki farkları incelemiştir. Benzer hava şartlarındaki günleri dikkate alarak, güneş bacalı evde harcanan günlük elektrik tüketimi %10-20 oranında azalma gösterdiği belirtmişlerdir [9]. Yedder ve Bilgen tarafından yapılan çalışmada, Trombe duvarlı bir sistemin termal performansını, akışı laminer ve iki boyutlu kabul ederek, sayısal olarak incelemiştir [10]. Onbaşıoğlu ve Eğrican yapmış oldukları çalışmada, pasif ısıtma sistemlerinin termal performanslarını, hız, sıcaklık ve akı ölçümleri yaparak, ısı kazancına etkilerini deneysel olarak incelemiştir [11]. Ong bu çalışmada, tromble duvarın matematiksel modellemesini yapmıştır. Sürekli rejimdeki ısı transfer denklemleri; cam ile yüzeylerdeki toplayıcı duvar sıcaklıkları ve ısıl direnç kullanılarak, kanaldaki hava akışı tespit edilmeye çalışılmıştır. Klasik Trombe duvarında güneş enerjisi duyulur ısı şeklinde depolanır, fakat birim kütle başına ısı depolama kapasitesi çok daha yüksek olması nedeniyle, faz değişim maddesi içeren Trombe duvarı çok daha cazip olduğunu belirtmişlerdir FDMli Trombe duvarın, yapı olarak klasik Trombe duvarıyla benzer bir konstrüksiyona sahiptir. Ararlarındaki tek fark, klasik Trombe duvarındaki kalın tuğla duvarın yerini çok daha ince ve içerişi faz değişim maddesi ile doldurulmuş bir yapı elemanının almasıdır. Gün boyu gelen güneş ışınımı FDMlerin ergimesine neden olur ve böylece güneş enerjisi gizli ısı şeklinde FDM içerisinde depolanır. Gece boyunca duvardan ısı çekilerek binaya verilir ve sonuçta FDM yeniden katılaştır (rejenerasyon). Sonuç olarak FDMli Trombe duvar, klasik Trombe duvarına göre daha hafiftir, daha az hacim işgal eder ve ısıl sığası daha yüksektir [12]. Onishi vd. ısı depolama malzemesi olarak FDM kullanıldığı varsayılarak karışık bir ısıtma sisteminin basit performansını sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada pasif güneş enerjili Trombe duvar modeli, oda sıcaklığı şartlarında ele alınmıştır. Aynı zamanda hesaplamalı akışkan dinamiği (CFD) kullanılarak zamana bağlı çözüm yapılmıştır. Sonuç olarak; FDM ile ısıtmanın daha etkili olduğunu ve bu yöntem karışık sistemli, düşük enerjili evlerin geliştirilmesinde daha kolay bir şekilde uygulanabileceğini söylemişlerdir [13]. Swet (1980) ve Ghoneim vd. (1991) FDM olarak NaCO₃.10H₂O kullandıkları Trombe duvarının klasik Trombe duvarına göre daha ince ve performansının daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Knowler (1983) CG parafin wax içerisine metal katılarak FDMli Trombe duvarın toplam ısı iletim katsayısını ve ısıl veriminin arttığını söylemişlerdir [14,15].

Bu çalışmada 3. Bölgede yer alan Isparta ili için hesaplar yapılmış olup farklı duvar modelleri (klasik duvar, cam yünlü yalıtımlı duvar, taş yünlü yalıtımlı duvar, tromble duvar ve FDMli tromble duvar) incelenmiştir. Yalıtım malzemesi olarak taş yünü ve cam yünü kullanılmıştır. Bu duvar modelleri için yapılan analizlerden elde edilen sıcaklık ve ısı akışı verileri karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler karşılaştırıldığında; iç ortam duvar sıcaklığı FDMli tromble duvar modelinde daha iyi sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Klasik duvar modelinde

34350 W/m², cam yünlü yalıtımlı duvarda 11963 W/m², taş yünlü yalıtımlı duvarda 10944 W/m², tromble duvarda 9045 W/m² ve FDMli tromble duvar modelinde ise 8355 W/m² ısı akısı olduğu hesaplanmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Ülkemizde, genellikle klasik olarak bilinen dış sıva, tuğla ve iç sıvadan oluşan duvar model uygulaması kullanılmaktadır. Özellikle son yıllarda ısıtma giderlerindeki artışlar nedeniyle, insanlar bina dış cephelerini yalıtım malzemeleriyle yalıtma yoluna giderek ısıtma giderlerini azaltmaya çalışmaktadırlar. Cam yünü ve taş yünü yalıtım malzemeleri açık gözenekli malzemelerdir. Bu yalıtım malzemeleri genellikle mantolama olarak da adlandırılan duvarların dış yüzeyine yapılan ısı yalıtım uygulamalarında kullanılır [16]. Tromble duvar uygulaması binanın güney duvarının dış tarafı tek ya da çift camlı olarak yapılır. İç taraf duvar materyalleri ya da su tanklarından oluşmuş, güneş ışınımını absorbe etmek için siyah boya ile kaplanmış bir duvardır. Isı, duvar ve cam arasındaki alan boyunca havaya iletilir ve zorlanmış ya da doğal taşınım ile sirküle edilir. Depolama birimi aynı zamanda çatı veya tavanın bir parçası olabilir [17]. FDMli tromble duvarda ise; dış tarafta cam, arada yalıtım amaçlı hava boşluğu ve iç tarafta FDM bulunmaktadır. Kullanılan FDM, gelen ışınımı absorbe ederek faz değiştirirken ışık geçirgenliği de artar. Işık geçirgenliği katı halde iken 0,4 sıvı halde iken 0,9 olarak verilmektedir. Böylece güney cephe hem bir aydınlatma elemanı hem de ısı depolama elemanı olarak görev yapmaktadır. Bu tasarımla güney cepheden olan ısı kaybı ve ısı kazancında sırasıyla %30 ve %50 azalma olduğu belirtilmektedir [18]. Yapılan bu çalışmada klasik duvar, cam yünlü yalıtımlı duvar, taş yünlü yalıtımlı duvar, tromble duvar ve FDMli tromble duvar duvar modelleri incelenmiştir. Analizlerde kullanılmak üzere tasarlanan duvar modeline ait ölçüler Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Tasarlanan duvar modellerine ait ölçüler

Bina duvarları, binayı dış ortamın olumsuz etkilerinden koruduğu gibi aynı zamanda binada en çok ısı kaybının yaşandığı yerlerinden biridir. Bu nedenle binanın dış duvarlarında kullanılan yalıtım malzemeleri ısı kaybı hesaplamalarında önemlidir. Ülkemizde ısı yalıtımı için “TS 825 (Binalarda Isı Yalıtımı Kuralları

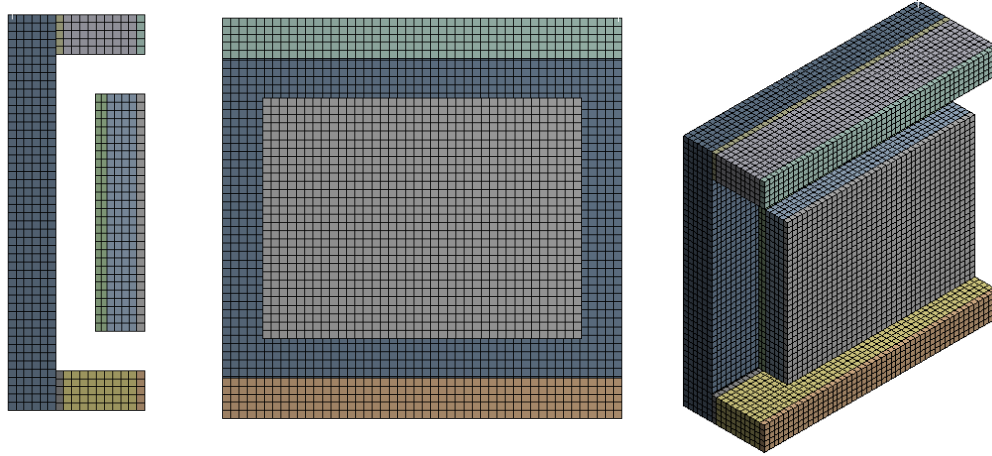
Standardı) Standardı” esas alınmaktadır. “TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı” göre Türkiye dört farklı bölgeye ayrılmıştır [19]. Ayrıca FDM için ısı iletkenlik katsayısı laboratuvar ortamında testlere tabii tutularak ölçülmüş analizler için gerekli olan sıcaklıktaki değerler hesaplanmıştır. Duvar bileşenlerine ait özellikler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Duvar bileşenlerinin özellikleri

Duvar bileşenleri	Kalınlık (m)	Isı iletkenlik değeri (W/mK)	R (m ² K/W)
Cam [19]	0.12	1.8	0.055
Dış sıva [19]	0.02	1.6	0.013
Taş yünü [19]	0.05	0.035	1.429
Cam yünü [19]	0.05	0.040	1.143
Tuğla [19]	0.185	0.39	0.487
İç sıva [19]	0.02	1	0.020
FDM	0.05	0.3006 (288 K) 0.3002 (298 K)	0.655

2.1 Duvar modellerinin nümerik analizinde kullanılan temel denklemler ve analiz çözümlemesindeki metotlar

Duvar modelleri için HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizlerinde sayısal ağ yapısı oluşturulmuştur. Yapılan bu tasarım için Şekil 3’te verilen ağ yapısına göre CFD analizleri için Ansys yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu duvar modellerinde 97686 elaman, 102590 adet düğüm noktası bulunmaktadır.



Şekil 3. Duvarın ağ yapısı

Programlardan alınan mesh dosyalarına sınır şartları ve parametreler uygulanarak sistemin çözümü yapılmaktadır. Çözümlemelerde dış ortam sıcaklığı, Isparta ili için Ocak ayında kabul edilen sıcaklık değeri -1°C ve dış ortam konveksiyon katsayısı olarak $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ kabul edilmiştir. Duvarın iç yüzey sıcaklığı 22°C ve iç ortam konveksiyon katsayısı olarak $7.69 \text{ W/m}^2\text{K}$ kabul edilmiştir.

2.2 Duvar modelinin matematiksel analizi

Bu çalışmada sadece duvar yüzeyinde ısı kayıplarının olduğu kabul edilmiştir. Duvarın birim alandan gerçekleşen ısı kaybı Denklem 1’de gösterildiği gibi hesaplanabilir [20].

$$\dot{q} = U\Delta T \quad (1)$$

Burada, “U” (W/m²K) toplam ısı geçiş katsayısıdır. Bir duvar için toplam ısı geçiş katsayısı Denklem 2 ile hesaplanabilir [20].

$$U = \frac{1}{R_d} + \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_{izo}} + \frac{1}{R_o} \quad (2)$$

Burada, “R_i” ve “R_o” sırası ile iç ve dış yüzeyin ısı dirençleri, “R_d” yalıtımsız duvar tabakalarının ısı direnci, “R_{izo}” ise, yalıtım malzemesinin ısı direncini ifade eder. Ayrıca R_{izo} yalıtım malzemesinin ısı direnci Denklem 3’te verilmiştir [20].

$$R_{izo} = \frac{x}{k} \quad (3)$$

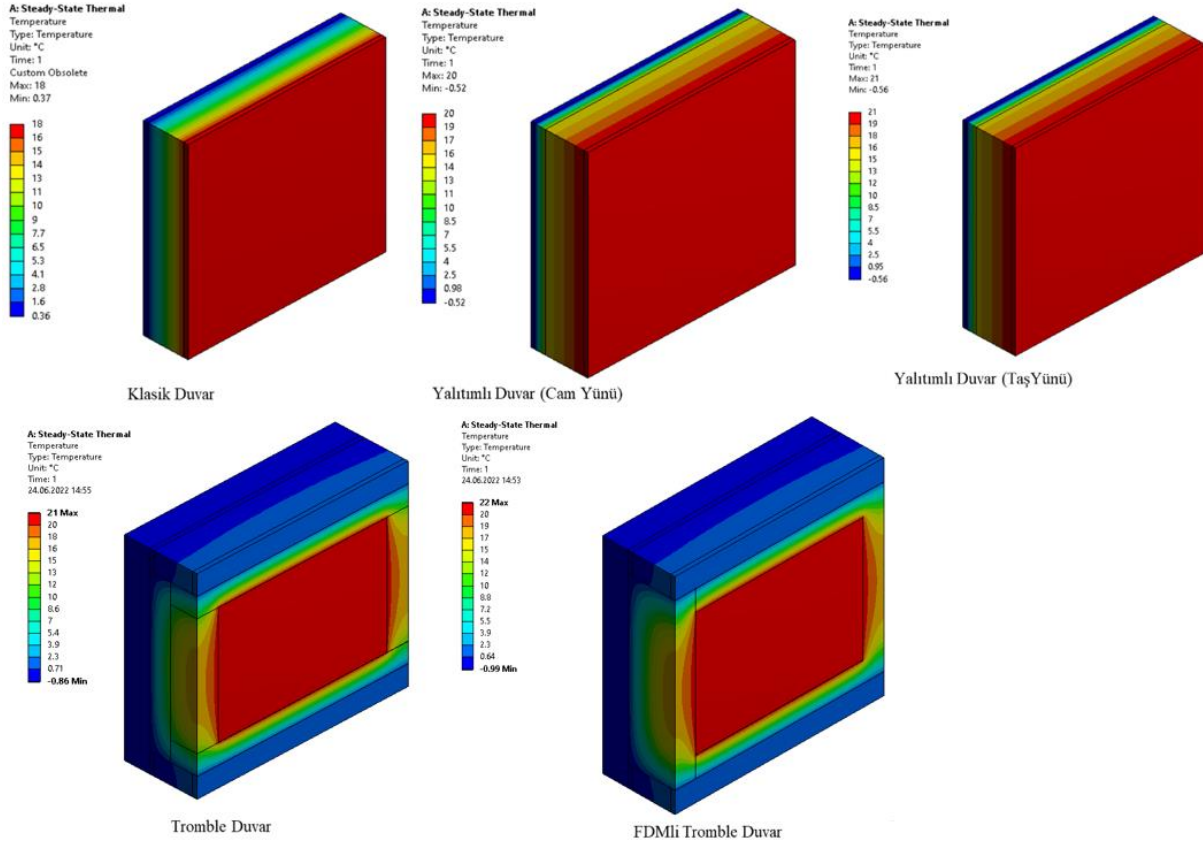
Denklem 3’te “x” yalıtım malzemesinin kalınlığını (m), “k” ise yalıtım malzemesinin ısı iletkenliğini (W/mK) katsayısını ifade etmektedir. Yalıtımsız bir duvar tabakasının toplam ısı direnci (R_{TD}), “R_o”, “R_d” ve “R_i” nin toplamı kabul edilirse Denklem 2’deki ifade Denklem 4’e dönüştürülerek sadeleştirilebilir [20].

$$U = \frac{1}{R_{izo} + R_{TD}} \quad (4)$$

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

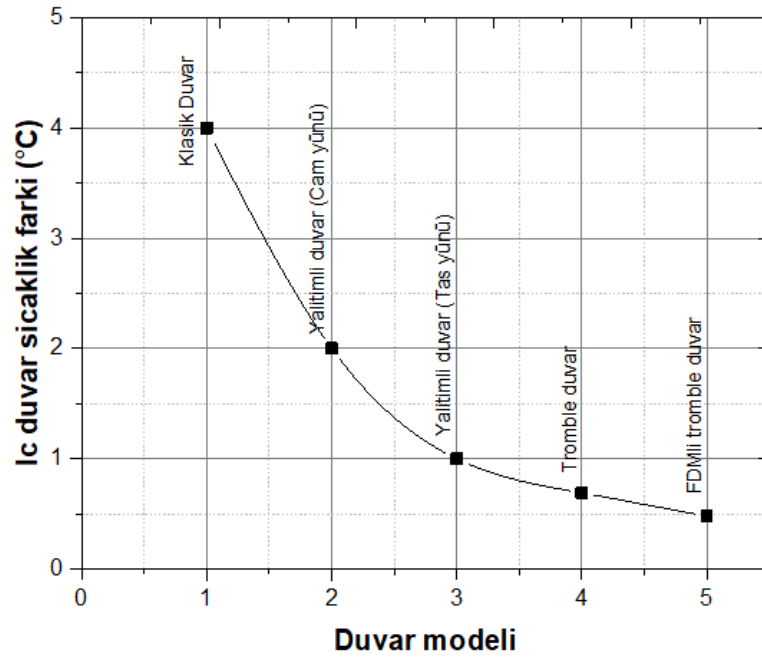
Bir binanın duvarı için 3D tasarımlar tamamlandıktan sonra analizleri gerçekleştirilmiştir. Öncelikle çalışmada 2 cm iç sıva, 18,5 cm tuğla ve 2 cm dış sıvadan oluşan klasik bir duvar modeli için termal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu duvarlarda kullanılmak üzere 5 cm taş yünü ve cam yünü kullanılarak yalıtım sağlanmış ve bu yeni yalıtımlı duvarlar için analizler yapılmıştır. Daha sonra tromble duvar modeli ve FDMli tromble duvar modeli için analizler gerçekleştirilmiştir. Ansys yazılımında kullanılmak üzere 3. bölgede yer alan Isparta iline ait iç ve dış ortam sıcaklıkları belirlenmiştir. Analizlerde dış ortam sıcaklığı, Isparta ili için Ocak ayında kabul edilen sıcaklık değeri -1 °C ve dış ortam konveksiyon katsayısı olarak 25 W/m²K kabul edilmiştir. Duvarın iç yüzey sıcaklığı 22 °C ve iç ortam konveksiyon katsayısı olarak 7.69 W/m²K kabul edilmiştir. Analizlerde duvarın sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Şekil 4’te duvar modellerine ait sıcaklık dağılım konturlarının değişimleri verilmiştir.

Şekil 4’ten de görüleceği üzere klasik duvarda dış sıva ve iç sıva tarafındaki sıcaklık farkının daha yüksektir. Cam yünlü yalıtımlı duvar, taş yünlü yalıtımlı duvar ve tromble duvar modellerinde sıcaklık farkının daha az olduğu görülmektedir. En az sıcaklık farkının FDMli tromble duvarda olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4. Duvar modellerinin sıcaklık dağılım konturları

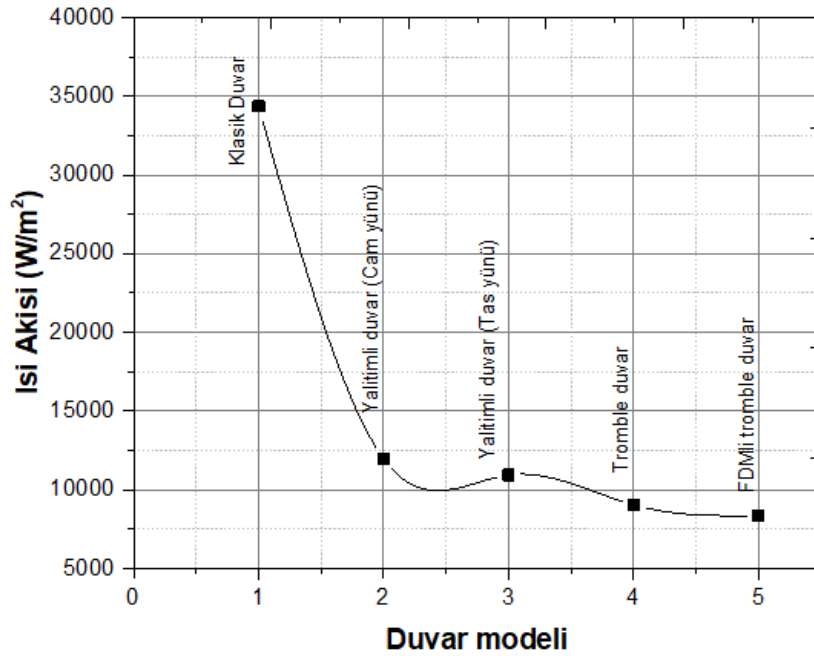
Şekil 5'teki grafikte; iç ortamda bulunan iç duvar tarafındaki sıcaklık farkı verilmiştir.



Şekil 5. Duvar modellerinde iç duvar sıcaklık farkı grafiği

Şekil 5'ten de görüldüğü üzere duvar modellerinin iç duvar sıcaklık farkı grafiği verilmiştir. Bu grafikten de görüldüğü üzere klasik duvar modelinde 4 °C, cam yünlü yalıtımlı duvarda 2 °C, taş yünlü yalıtımlı duvarda 1°C, tromble duvarda 0.69 °C ve FDMli tromble duvar modelinde ise 0.48 °C sıcaklık farkı olduğu hesaplanmıştır.

Şekil 6'daki grafikte, farklı duvar modellerine göre ısı akısı grafiği verilmiştir.



Şekil 6. Farklı yalıtım kalınlıklarına sahip duvar modellerinin ısı akısı grafiği

Şekil 6'dan da görüldüğü üzere farklı duvar modellerinin ısı akısı grafiği verilmiştir. Bu grafikten de görüldüğü üzere klasik duvar modelinde 34350 W/m², cam yünlü yalıtımlı duvarda 11963 W/m², taş yünlü yalıtımlı duvarda 10944 W/m², tromble duvarda 9045 W/m² ve FDMli tromble duvar modelinde ise 8355 W/m² ısı akısı olduğu hesaplanmıştır.

Şekil 5 ve 6 incelendiğinde, klasik duvar ile FDMli tromble duvar arasındaki sıcaklık farkının yaklaşık 3.5 °C daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca FDMli tromble duvarda %24 daha az ısı kaybının olduğu gözlemlenmiştir. Literatür ile karşılaştırıldığında FDMli tromble duvarın daha iyi sonuçlar verdiği doğrulanmıştır [2,6,17]. Ayrıca kış mevsiminde uygun koşullar sağlandığında bina içine temiz ve sıcak hava girmesini sağladığından bina içindeki hava kalitesini arttığı gibi ısınma için kullanılan enerjiden tasarruf sağlar. Yazın da binanın soğutma yükünü azaltır. Enerji tasarrufu da sağladığından kısa sürede kendisini amorti edebilir. Bütün bu avantajlarının yanı sıra, uzun ömrü olmasıyla da tercih edilmektedir.

4. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında bir binaya ait farklı duvar modelleri için 3D tasarımlar tamamlanmıştır. Daha sonra bu duvar modelleri için analizler gerçekleştirilmiştir. Öncelikle çalışmada 2 cm iç sıva, 18,5 cm tuğla ve 2 cm dış sıvadan oluşan klasik bir duvar için termal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu duvarlarda kullanılmak üzere 5 cm taş yünü ve cam yünü kullanılarak yalıtım sağlanmış ve bu yeni yalıtımlı duvarlar için analizler yapılmıştır. Daha sonra tromble duvar modeli ve FDMli tromble duvar modeli için analizler gerçekleştirilmiştir. Ansys yazılımında kullanılmak üzere 3. bölgede yer alan Isparta iline ait iç ve dış ortam sıcaklıkları belirlenmiştir. Isparta için ocak ayı verilerine göre iç ortam sıcaklığı 22 °C ve dış ortam sıcaklığı -1 °C olarak kabul edilmiştir. Analizlerde duvar modellerine ait sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler karşılaştırıldığında; FDMli tromble duvar modelinde diğer duvar modellerine göre daha iyi sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Klasik duvar modelinde 34350 W/m², cam yünlü yalıtımlı duvarda 11963 W/m², taş yünlü yalıtımlı duvarda 10944 W/m², tromble duvarda 9045 W/m² ve FDMli tromble duvar modelinde ise 8355 W/m² ısı akısı olduğu hesaplanmıştır. En iyi ısı akısı ve en az sıcaklık farkı sonuçlarının ise FDMli tromble duvarda olduğu hesaplanmıştır.

REFERANSLAR

- [1] Doğan A., Pırasacı T. 2007. “Bina Cephelerinde Yalıtım Yerine Trombe Duvar Kullanımının İncelenmesi” Ulusal İklimlendirme Kongresi, İKLİM2007, Türkiye, 15-18 Kasım 2007.
- [2] Khanlar A. 2013. “Güneş Duvarı Sistemlerinin Dünyadaki Uygulamaları ve Türkiye’deki Uygulanabilirliği” Yüksek Lisans Tezi. Hacettepe Üniversitesi Temiz Tükenmez Enerjiler Anabilim Dalı, Ankara.
- [3] Uçar, A. ve Balo, F., 2010. “Determination of the energy savings and the optimum insulation thickness in the four different insulated exterior walls”, *Renewable Energy*, 35, 1, 88-94. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.009>
- [4] Yu, J., Yang, C., Tian, L., Liao, D., A study on optimum insulation thicknesses of external walls in hot summer and cold winter zone of China, *Applied Energy*, 86, 2520-2529, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.03.010>
- [5] Gölcü, M., Dombaycı, A, Ö., Abalı, S., “Denizli İçin Optimum Yalıtım Kalınlığının Enerji Tasarrufuna Etkisi ve Sonuçları”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 21, No 4, s. 639-644, 2006.
- [6] Liu, X., Chen, Y., Ge, H., Fazio, P. ve Chen, G., (2015). Determination of optimum insulation thickness of exterior wall with moisture transfer in hot summer and cold winter zone of China, *Procedia Engineering*, 121, 1008-1015. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.072>
- [7] Zalewski, L. Charitant, M. Lassue, S. Duthoit, B., 1997, Experimental thermal study of a solar wall of composite type, *Energy and Buildings*, 25, 7-18. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)00974-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)00974-7)
- [8] Pieter, D. W., 2004, Marinus Van Der Voorden, Providing Computational Support for the Selection of Energy Saving Building Components, *Energy and Buildings*, 36, 749-758. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.003>
- [9] Khedari, J. Rachapradit, N. Hirunlabh, J., 2003, Field Study of Performance of Solar Chimney with Airconditioned, *Building Energy*, 28, 1099-1114. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(03\)00092-6](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(03)00092-6)
- [10] Yedder, R. B. ve Bilgen, E. (1991). Natural convection and conduction in Trombe wall systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 34(4-5), 1237-1248. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(91\)90032-A](https://doi.org/10.1016/0017-9310(91)90032-A)

- [11] Onbasioglu, H., ve Egrican, A. N. (2002). Experimental approach to the thermal response of passive systems. *Energy conversion and management*, 43(15), 2053-2065. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00138-8](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00138-8)
- [12] Ong, K. S. A., 2003, Mathematical Model of a Solar Chimney, *Renewable Energy*, 28, 1047-1060. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(02\)00057-5](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00057-5)
- [13] Onishi, J. Socda, H. Mizuno, M., 2001, Numerical Study on a Low Energy Architecture Based upon Distributed Heat Storage System, *Renewable Energy*, 22, 61-66. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(00\)00049-5](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00049-5)
- [14] Swet, C. J. (1980). Phase change storage in passive solar architecture. *Proc. Annu. Meet.-Am. Sect. Int. Sol. Energy Soc.;*(United States), 5(CONF-801016-(Vol. 1)).
- [15] Ghoneim, A. A., Klein, S. A., & Duffie, J. A. (1991). Analysis of collector-storage building walls using phase-change materials. *Solar energy*, 47(3), 237-242. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(91\)90084-A](https://doi.org/10.1016/0038-092X(91)90084-A)
- [16] Bayraktar, D., Bayraktar, E.A., (2016). Mevcut binalarda ısı uygulamalarının değerlendirilmesi, *Akif Ersoy Mehmet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7, 1, 59-66.
- [17] Kurtbaş İrfan, (2005). *Elazığ Şartlarında Trombe Duvar Uygulanabilirliğinin İncelenmesi*", Doktora Tezi, Makina Mühendisliği, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [18] Kurnuç Çırakman Aslıhan, 2010, "Faz Değiştiren Madde İçeren Bina Güney Duvarının Deneysel Olarak İncelenmesi" Doktora Tezi, Makina Mühendisliği, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- [19] TS 825, (2008). *Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [20] Gürel, A. E., & Cingiz, Z., 2011. "Farklı dış duvar yapıları için optimum ısı yalıtım kalınlığı tespitinin ekonomik analizi". *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15(1), 75-81.