

Farklı Yönlendirmeli Bina Dış Duvarlarında Faz Değiştiren Malzeme Kullanımının Isı Kazancına Etkisinin Araştırılması

Meral ÖZEL¹, Fethi Ahmet ÇAKMAK^{2*}

¹ Makine Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

² Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Soma MYO, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, Türkiye

¹ mozel@firat.edu.tr, ² fethi.cakmak@cbu.edu.tr

(Geliş/Received: 25/11/2022;

Kabul/Accepted: 21/03/2023)

Öz: Bu çalışmada, farklı yönlerde bina dış duvarlarında geleneksel ısı yalıtım malzemesi yerine faz değiştiren malzeme (FDM) kullanılarak soğutma yükleri ANSYS Fluent programı ile nümerik olarak araştırılmıştır. Analizler iki boyutlu ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Elazığ ilinin yaz iklim şartları göz önünde bulundurularak bina dış yüzeyinin 24 saat boyunca değişen güneş ışınımı ve dış ortam sıcaklıklarına maruz bırakıldığı iç yüzeyinin ise sabit sıcaklıkta oda havasıyla temasta olduğu kabul edilmiştir. Bu amaçla 5 farklı duvar modeli belirlenerek ilk olarak duvar kalınlığı boyunca sıcaklık dağılımları ve soğutma yükleri hesaplanmış ve daha sonra ise ısı depolama kapasitelerini temsil eden faz kayması ve sönüm oranları tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar mevcut yalıtım ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak, duvara yalıtım yerine aynı kalınlıkta FDM uygulanarak tüm duvar yönlendirmeleri için dış sıcaklık dalgalanmaları sönümlenip iç yüzey yayılımının en aza indirilmesi sağlanmıştır. Ayrıca duvara FDM uygulanarak maksimum faz kayması ve minimum sönüm oranı açısından duvarın ısı depolama kapasitesinin de arttığı görülmüştür. Faz değiştiren malzemenin dışta kullanılmasının daha verimli olduğu görülmüş ve yalıtımsız duvara göre iç yüzeyde 20C daha düşük sıcaklık elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan UDF (User-defined function) kodu sayesinde her bir saatteki sıcaklık değerleri değişken sınır şartı olarak verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Faz değiştiren malzeme, farklı duvar yönlendirmeleri, soğutma yükü, faz kayması ve sönüm oranı.

Investigation Of The Effect Of Using Phase Change Materials On Heat Gain At Building Walls With Different Orientations

Abstract: In this study, cooling loads were investigated numerically with ANSYS Fluent program by using phase change material (PCM) instead of traditional thermal insulation material on the exterior walls of buildings facing different directions. Analyzes were carried out in two dimensions and depending on time. Considering the summer climatic conditions of the Elazığ province, it is assumed that the building's outer surface of the building is exposed to changing solar radiation and outdoor temperatures for 24 hours, and the inner surface is in contact with the room air at a constant temperature. For this purpose, five different wall models were considered and firstly, the temperature distributions and cooling loads were calculated along the wall thickness, and then the time lag and decrement factor represented the thermal storage capacities were determined. The results obtained were compared with the existing insulation. As a result, by applying PCM of the same thickness to the wall instead of insulation, external temperature fluctuations for all wall orientations are reduced and its spread to the interior surface is minimized. In addition, it was observed that the heat storage capacity of the wall increased from the point of view of maximum time lag and minimum decrement factor by applying PCM to the wall. It has been seen that the use of phase change material on the outside is more efficient and 20C lower temperature is obtained on the inner surface compared to the non-insulated wall. Owing to the UDF (User-defined function) code used in the study, the temperature values in each hour are given as variable boundary conditions.

Key words: Phase change material (PCM), different wall orientations, cooling loads, time lag, decrement factor.

1. Giriş

Dünyadaki öncelikli enerji kaynaklarının hızlı bir şekilde tükenmesinden dolayı başta gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler olmak üzere bütün ülkeler enerjiye duyulan ihtiyacı kontrol altına almak ve enerjiyi daha verimli kullanmak için belirli yöntemler geliştirmektedir. Ülkemizde de bu enerji tüketimi başta sanayi olmak üzere konutlarda ve diğer alanlarda her yıl giderek artmaktadır. Özellikle konutlarda bu tüketim daha çok ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarını karşılamak içindir. Bu enerjinin daha verimli kullanılması için bina dış duvarlarına ısı yalıtımının uygulanması önemli bir parametredir.

* Sorumlu yazar: fethi.cakmak@cbu.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-9516-4715, ² 0000-0003-4575-5055

Binalarda ısı yalıtımı, kış aylarında soğuktan yaz aylarında ise sıcaktan korunmak için yapılmaktadır. Isı yalıtımı sayesinde yaz ve kış şartlarında ısı konforu sağlamak için tüketilen enerji azaltılmış olur. Bunun yanı sıra, ısınmak için fosil yakıt tüketiminden kaynaklanan emisyonları azaltıp hava kirliliğinin azalmasına da önemli rol oynamaktadır [1]. Bu çalışmada, ısı yalıtım malzemelerine alternatif olarak, termal enerji depolama özelliğinden dolayı faz değiştiren malzemeler kullanılmıştır. Faz değiştiren malzemeler termal enerjinin gizli ısı şeklinde depolandığı malzemelerdir. FDM'nin bina uygulamalarında kullanımına tuz hidratlarının bir binada kullanılması ile 1970 yılında başlanmıştır.

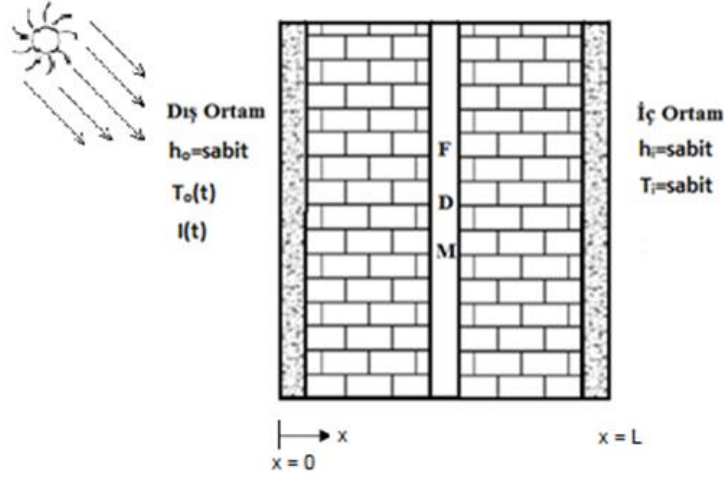
Literatür araştırması yapıldığında FDM'ler ile ilgili deneysel ve sayısal olmak üzere birçok farklı uygulamayla karşılaşmıştır. Bu konu ile ilgili olmak üzere yapılan çalışmalar incelendiğinde Sun vd.[2] pasif alan soğutması amacıyla faz değiştiren malzeme ile donatılmış duvarın analizlerini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmalarında uygun yalıtım kalınlığı 7 mm olarak saptanmıştır. Ayrıca yalıtımın duvar dış yüzeyine yakın olduğu durumun ısı performans açısından daha makul olduğu görülmüştür. Kürklü vd. [3] serayı dondan korumak amacıyla erime ve donma sıcaklığı sırasıyla 8°C ve 4°C olan faz değiştiren malzemeler kullanılmıştır. Faz değiştiren malzeme kullanılmayan sera ile kıyaslandığında 2°C civarı sıcaklık farkı olduğu görülmüştür. Zhang vd. [4] ılıman iklimin etkisindeki bir bölgede bina duvarında faz değiştiren malzeme kullanılarak ısıtma yükündeki değişimleri sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. FDM'siz klasik duvara göre ısıtma süresinin %89 düşürüldüğü görülmüştür. Tian vd. [5] duvarda faz değiştiren malzeme kullanımının yalıtım performansına etkisini incelemek amacıyla bir deney seti kurmuşlardır. Bu deney seti ile aynı anda klasik duvar ile FDM'li duvar çeşitli hava şartlarına göre test edilmiştir. Deneyler sonucunda FDM'nin duvarın dış kısmında kullanılmasının daha uygun olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca iç yüzeyin maksimum sıcaklığının 0.2 °C daha düşük olduğu saptanmıştır. Çevik [6], Türkiye'nin güneydoğusunda duvar yapısının ısı verimini artırmak ve ısı yalıtım alternatifi oluşturmak amacıyla iki özdeş test odası inşa etmiştir. Test odalarından birinin duvarı FDM doldurulmuş polikarbonat malzeme ile kaplanmıştır. Deneyler sonucunda FDM ile kaplanan duvarın kaplanmayana göre daha iyi ısı yalıtım etkisi yaptığı görülmüştür. Tokuç [7], faz değiştiren malzemelerin ısı depolama amacıyla yeni nesil bina malzemesi olarak kullanımının enerji kazanımı sağlayacak bir yöntem geliştirmesini amaçlamıştır. Kullanılan yöntem ile elde edilen sonuçlarda FDM ile geliştirilen yapı bileşenlerinin binalarda kullanımına yardımcı olabilecek veriler tartışılmış ve sonraki çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

Örengül [8], yapıların FDM içeren tavanın ısı yalıtımına olan etkisini deneysel olarak araştırmıştır. Bu amaçla iki özdeş yapı inşa etmiştir. Yapıların birinin tavanı FDM doldurulmuş delikli tuğlayla örülmüştür. Sonuç olarak FDM kullanılan tavanın diğerine göre daha iyi bir günlük ısı yalıtımı sağladığı saptanmıştır. Konuklu [9], faz değiştiren malzemelerinin mikrokapsüllenecek enerji depolama özelliğinin binalarda sağlayacağı enerji tasarrufunu incelemiştir. Sonuçlar uygulamanın; kış şartlarında ısıtma için %10-15 arası ve yaz şartlarında soğutma için %5-10 arası verim sağladığını göstermiştir. Kurt [10], beton karışımlarında faz değiştiren malzeme kullanarak dayanımı bozmadan ısı performansını artırmayı amaçlamıştır. Bu amaçla faz değişim sıcaklığı 23-26 °C olan 110 J/g gizli ısıya sahip parafin kullanmıştır. FDM kullanılan betonun kullanılmayana göre daha yüksek bir ısı performansına sahip olduğunu göstermiştir. Quanying vd. [11], duvarlara farklı şekilde yerleştirilmiş faz değiştiren malzemelerin termal özelliklerini incelemek için parafin kullanmıştır. Faz değiştiren malzeme kullanılan duvar ile klasik beton duvar karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre doğrudan karıştırma yöntemine nazaran laminasyon enterpolasyon yöntemi ile hazırlanan duvardaki enerji tasarrufu daha iyi olmuştur. Bu yöntem ile hazırlanan faz değişim malzemesinin gizli ısı depolama kapasitesi ve daha belirgin enerji tasarrufu sağladığı görülmüştür. Laminasyon yönteminin karmaşık ve uygulanabilirliğinin zorluğu vurgulanmıştır. Hasana vd. [12], yalıtım olarak faz değiştiren malzeme kullanımını deneysel olarak incelemişler. Bu çalışma için standart ve FDM kullanılan iki ayrı oda inşa ederek faz değiştiren malzeme olarak 44°C erime sıcaklığına sahip olan parafin kullanmışlar. Çalışma sonucunda FDM kullanılan odanın standart odaya kıyasla enerji tasarrufu açısından daha avantajlı olduğu görülmüştür. Kandasamy vd. [13], taşınabilir elektronik cihazların termal yönetimi için bir FDM paketini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmayı çeşitli şartlar altında gerçekleştirip sayısal sonuçlarla karşılaştırdıklarında FDM tabanlı tasarımlar için uygulanabilir olduğunu önermişlerdir. Yukarıda görüldüğü gibi literatürde FDM kullanımıyla ilgili çalışmaların çoğunun deneysel olduğu ve enerjinin depolanarak ortamın ısıtılması amaçlandığı görülmektedir. Ortamın soğutma yükünün azaltılmasıyla ilgili olan çalışmalar daha sınırlıdır ve duvar yönleri dikkate alınmamıştır.

Bu çalışmada ise farklı yönlerde bakan bina dış duvarlarında, geleneksel ısı yalıtım malzemesi yerine FDM kullanımının etkisi yaz şartları göz önünde bulundurularak soğutma yüklerinin hesaplanması suretiyle incelenmiştir. Analizler güney, kuzey, doğu ve batı yönleri için ANSYS Fluent programı ile gerçekleştirilmiştir. Gerçek şartlara yakın bir analiz gerçekleştirmek için bina dış yüzeyinin gün boyunca değişen güneş ışınımı ve dış ortam sıcaklıklarına maruz kaldığı göz önünde bulundurulmuştur. Bu amaç için Elazığ ilinin yaz iklim şartları göz önünde bulundurularak ve 5 farklı duvar yapısı ele alınarak ilk olarak duvar kalınlığı boyunca sıcaklık dağılımları ve soğutma yükleri hesaplanmıştır. Sonrasında ısı depolama kapasitelerini temsil eden faz kayması ve sönüm oranları tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar mevcut yalıtım ile kıyaslanmıştır.

2. Matematiksel Metot

FDM içeren katmanlı duvarın Şekil 1’de gösterildiği gibi dış yüzeyi 24 saat boyunca değişen güneş ışınımı ve dış ortam sıcaklıklarının etkisinde olduğu ve iç yüzeyinin ise sabit sıcaklıktaki iç ortam havası ile temasta olduğu kabul edilmiştir. Duvar iç ve dış yüzeyde 2 cm kalınlığında sıva, 2 cm FDM ve 20 cm tuğla olmak üzere toplam 26 cm’dir. Tuğla ve sıva katmanları için fiziki özelliklerin sıcaklıkla değişmediği ve homojen olduğu kabul edilmiştir. Duvar katmanları arasındaki temas direnci dikkate alınmamıştır.



Şekil 1. FDM’ li çok katmanlı duvar yapısı

Ortamın ısı kazancını hesaplayabilmek için duvarın iç yüzey sıcaklığını bilmek gerekir. Katmanlı düzlem duvarlarda sıcaklık dağılımı aşağıda verilen geçici rejimde bir boyutlu ısı iletiminin uygun sınır şartları kullanılarak çözülmesi ile elde edilir. Yapı elemanının yüksekliği ve genişliği kalınlığına göre daha büyük olduğu için duvar boyunca ısı geçişinin x yönünde bir boyutlu olarak gerçekleştiği kabul edilmiştir.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

burada ısı yayılım katsayısı $\alpha=k/(\rho c_p)$ olup k duvar malzemesinin ısı iletkenliği, ρ yoğunluğu ve c_p ısı kapasitesidir. İç ve dış yüzeydeki sınır şartları ise aşağıdaki gibidir [14].

$x=L$ için

$$-k \frac{\partial T(L, t)}{\partial x} = h_i (T_{x=L} - T_i) \quad (2)$$

$x=0$ için

$$-k \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = h_o (T_e - T_{x=0}) \quad (3)$$

burada T_e eşdeğer çevre sıcaklığı olup dış ortam sıcaklığı T_o , iç ortam sıcaklığı T_i , güneş ışınımı şiddeti I , duvarın güneş ışınımı emiciliği α ve dış yüzeyin taşınım katsayısı h_o ’a bağlı olarak dik duvar yüzeyleri için aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır. h_i ve h_o sırasıyla iç ve dış duvar yüzeylerindeki birleşik ısı transfer katsayılarıdır. Bu katsayılar, taşınım ve ışınım bileşenlerinin toplamı olup, 8 ve 23 W/m²K olarak alınmıştır [15].

$$T_e = T_o + \frac{\alpha_0 I}{h_o} \quad (4)$$

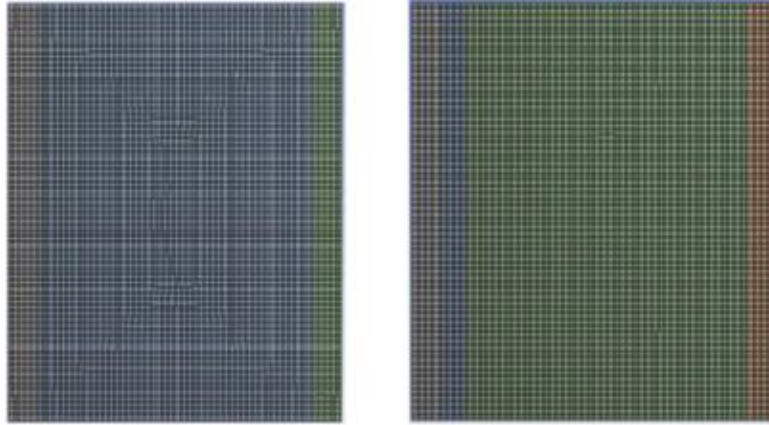
burada α_0 duvarın güneş ışınımı emiciliği olup 0.9 olarak alınmıştır. FDM 'nin katı-sıvı ara yüzeyi için aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır [16].

$$k_k \frac{\partial T_k}{\partial x} - k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = \rho L \frac{\partial S(t)}{\partial t} \quad (5)$$

2.1. Sayısal Yöntem

Bu çalışmada, farklı yönlere bakan bina dış duvarlarında geleneksel yalıtım malzemesi yerine FDM kullanımının etkisi yaz şartları göz önünde bulundurularak soğutma yükleri açısından sayısal olarak hesaplanmıştır. Analizler güney, kuzey, doğu ve batı yönleri için ANSYS Fluent programı ile gerçekleştirilmiştir. Program aşamaları aşağıda sıralanmıştır;

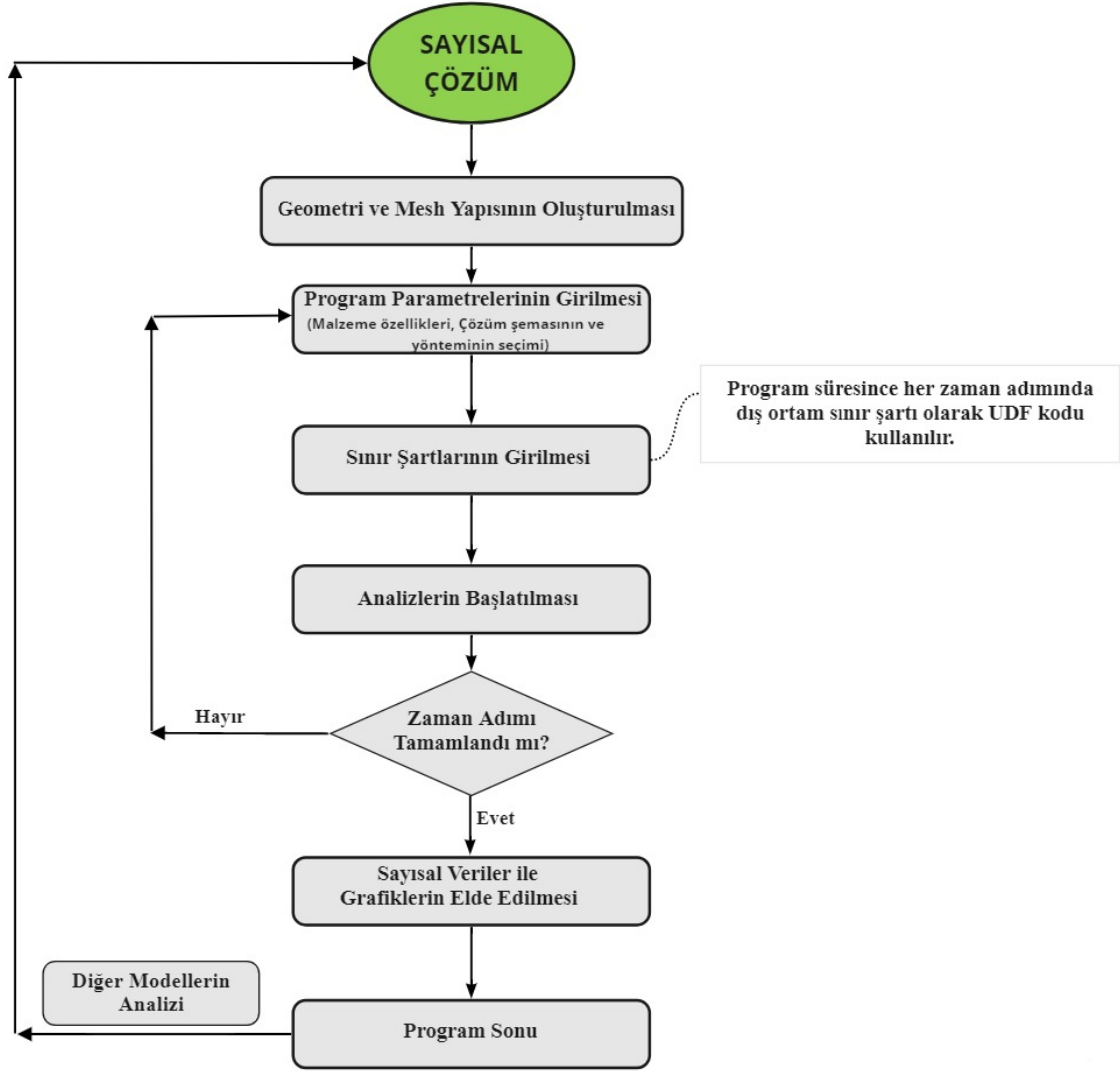
- *Geometri*: Bu aşamada yalıtımsız duvar ve FDM'nin içte, dışta, ortada olduğu duvar ile cam yünü ile ortadan yalıtılmış duvar modelleri için iki boyutlu beş farklı geometri çizilmiştir.
- *Ağ yapısı (mesh)*: ANSYS Fluent programında analizlerin düzgün yapılabilmesi için daha önce çizilen duvar modelleri üzerine ağ yapılarının atanması gerekmektedir. Analizlerin doğru bir şekilde yapılmasındaki en önemli parametrelerden birisi ağ yapısıdır. Bu çalışmada kare şeklinde ağ yapısı kullanılmıştır. Yalıtımsız duvar modelinde eleman sayısı 3808, düğüm sayısı ise 4067 olarak belirlenmiştir. FDM ve cam yünü ile yalıtılan duvar modellerinde ise eleman sayısı 3696, düğüm sayısı 4014 olarak belirlenmiştir. Yalıtımsız ve dıştan yalıtılmış duvar modellerine ait ağ yapıları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Ağ yapıları (mesh) (a) Yalıtımsız duvar modeli (b) Yalıtımın dışta olduğu duvar modeli

- *Çözüm adımları*: Bu adımda daha önceden geometrileri oluşturulup ağ yapıları atanan modeller için malzeme özellikleri, sınır şartları, çözüm metodları, iterasyon sayıları ve yakınsama değerleri programa girilmektedir. Sistem başlangıç sıcaklık değeri 18 °C olarak belirlenmiştir. Yakınsama değeri continuity= 1e-03, x-y velocity = 1e-03 ve energy = 1e-06 olarak girilmiştir. İterasyon sayısı 1000 olup her 3600 saniyede bir tüm değerler kayıt altına alınmıştır.

Bina dış yüzeyi 24 saat boyunca değişen dış ortam sıcaklığı ve güneş ışınımına maruz kaldığı için 24 farklı eşdeğer sıcaklık hesaplanmıştır. Değişken sıcaklık şartı kullanıcı tanımlı bir fonksiyon yardımı ile programa girilmektedir. Bunun için User Defined Function (UDF) sekmesi kullanılmıştır. Sıcaklıkların değişken sınır şartı şeklinde kullanılması amacıyla bir C kodu oluşturulmuştur. Bu kod sayesinde her bir saatin sıcaklığı farklı olacak şekilde ardıl günlerde tekrarlı olacak şekilde yazılmıştır. Bu sayede üç günlük bir süreçte her bir saatin değeri kendi zamanı geldiğinde sınır şartı olarak otomatik uygulanmıştır. ANSYS Fluent' de gerçekleştirilen bu programın akış şeması Şekil 3'de görülmektedir.

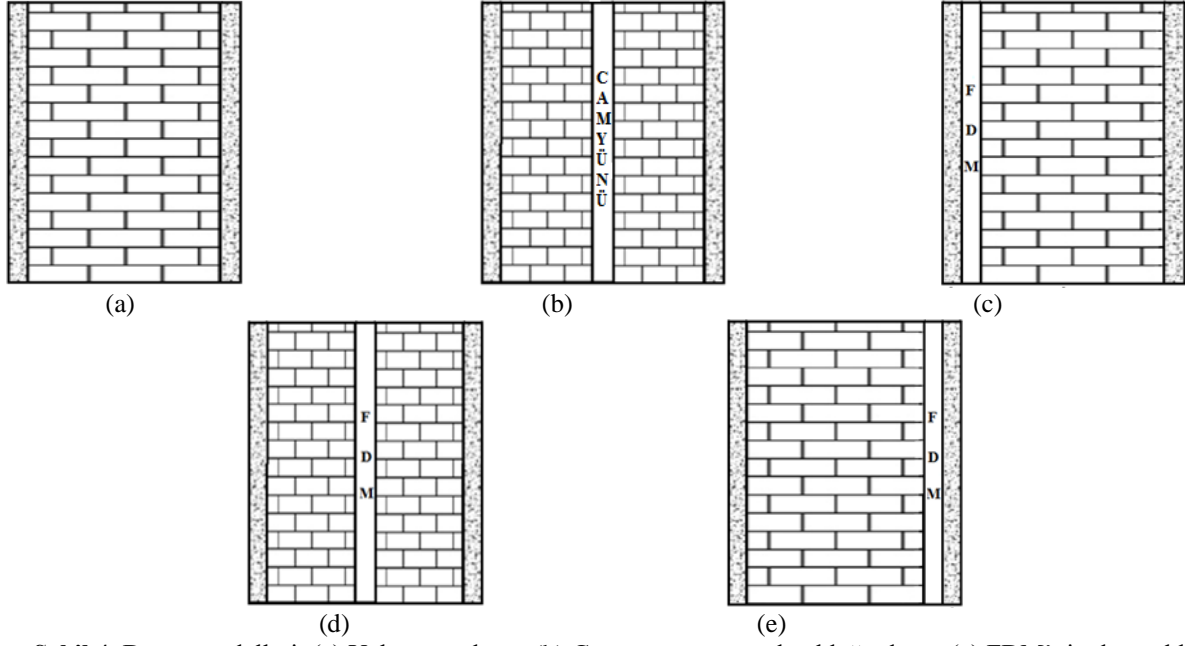


Şekil 3. ANSYS' de hazırlanan programın akış şeması

2.2. Duvar Modelleri

Bu çalışmanın ana amacı geleneksel ısı yalıtım malzemesi yerine FDM'nin kullanılması ve mevcut yalıtım ile kıyaslanmasıdır. Bu amaçla Şekil 4'de gösterilen 5 farklı duvar modeli belirlenmiş ve her bir duvar modeli için sıcaklık dağılımları ve ısı kazançları farklı duvar yönlendirmelerine göre hesaplanmıştır. Tüm duvar modellerinde duvar, iç ve dış yüzeyde 2 cm kalınlığında sıva, 2 cm FDM ve 20 cm tuğla olmak üzere toplam 26 cm'dir. Ayrıca cam yünü yalıtım malzemesinin kalınlığı da 2 cm olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada faz değiştiren malzeme olarak 28-30 oC aralığında erime özelliği olan parafin bazlı RT-27 seçilmiştir. FDM'nin erime katılma süresince gizli ısı özelliğini gösterebilmesi için uygun sıcaklık aralığında olması gerekir. Duvarın maruz kaldığı sıcaklıklar dikkate alındığında uygun erime sıcaklık değerinden dolayı Parafin bazlı RT-27 kullanılmıştır. Duvar yapısında kullanılan diğer malzemelerin ve seçilen FDM'nin termofiziksel özellikleri ise Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 4. Duvar modelleri: (a) Yalıtımsız duvar (b) Cam yününün ortada olduğu duvar (c) FDM'nin dışta olduğu duvar (d) FDM'nin ortada olduğu duvar (e) FDM'nin içte olduğu duvar

Tablo 1. Duvar yapısında kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri [17]

	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kgK)	k (W/mK)
Tuğla	1800	840	0.62
Sıva	1865	840	0.72
Cam yünü	105	795	0.036

Tablo 2. RT-27'nin termofiziksel özellikleri [18]

Erime aralığı	28 - 30 °C
Gizli Isı	179 kJ/kg
Katı haldeki ısı depolama kapasitesi	1800 J/kgK
Sıvı haldeki ısı depolama kapasitesi	2400 J/kgK
Katı haldeki termal iletkenliği	0.24 W/mK
Sıvı haldeki termal iletkenliği	0.15 W/mK
Katı haldeki sabit yoğunluğu	870 kg/m ³
Sıvı haldeki sabit yoğunluğu	760 kg/m ³
Sıvı haldeki dinamik viskozitesi	3.42x10 ⁻³ kg/ms

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Çevresel Şartlar

Bu çalışmada, yazın iç ortam sıcaklığının sabit 24°C, iç yüzey taşınım katsayısının ise yine sabit 8 W/m²K olduğu kabul edilmiştir. Dış ortamda ise taşınım katsayısı 23 W/m²K olarak kabul edilip dış ortam sıcaklığının ve güneş ışınımının gün boyunca değiştiği göz önünde bulundurularak 24 saat için eşdeğer çevre sıcaklığı belirlenmiştir. Bu sıcaklıklar güney, kuzey, doğu ve batı yönleri için sırasıyla Tablo 3-6'da gösterilmiştir.

Tablo 3. Yaz şartlarında güneye bakan duvarın eşdeğer çevre sıcaklıkları

t (saat)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T_e (°C)	24.28	22.90	22.20	20.80	20.63	22.46	27.63	31.21	37.36	42.49	46.52	48.40
t (saat)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
T_e (°C)	48.82	47.89	45.26	41.41	39.63	37.35	33.93	31.00	29.00	27.20	26.28	25.30

Tablo 4. Yaz şartlarında kuzeye bakan duvarın eşdeğer çevre sıcaklıkları

t (saat)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T_e (°C)	24.28	22.90	22.20	20.80	24.76	27.08	30.42	31.17	34.51	37.44	40.15	41.54
t (saat)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
T_e (°C)	42.45	42.84	42.41	41.37	41.42	41.98	38.06	31.00	29.00	27.20	26.23	25.30

Tablo 5. Yaz şartlarında doğuya bakan duvarın eşdeğer çevre sıcaklıkları

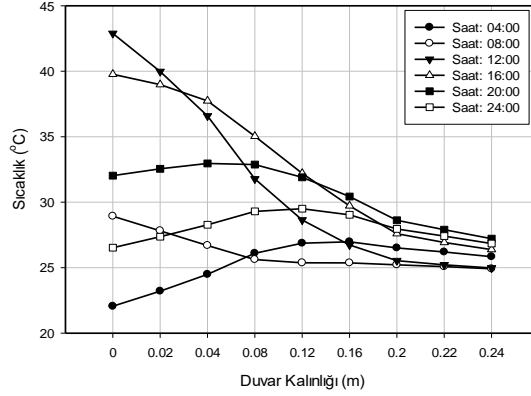
t (saat)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T_e (°C)	24.23	22.90	22.20	20.80	24.75	37.42	45.78	49.38	50.00	48.45	45.82	41.54
t (saat)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
T_e (°C)	42.45	42.84	42.41	41.37	39.63	37.36	33.93	31.00	29.00	27.20	26.22	25.30

Tablo 6. Yaz şartlarında batıya bakan duvarın eşdeğer çevre sıcaklıkları

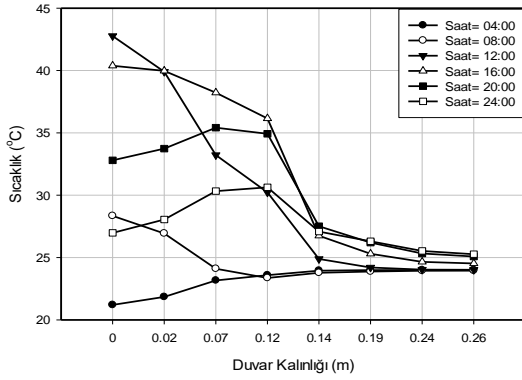
t (saat)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T_e (°C)	24.28	22.90	22.20	20.80	20.63	22.46	27.63	31.17	34.51	37.44	40.15	41.54
t (saat)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
T_e (°C)	48.12	53.85	57.91	59.58	57.78	52.32	38.06	31.00	29.00	27.20	26.28	25.30

3.2. Duvar Kalınlığı Boyunca Sıcaklık Dağılımları

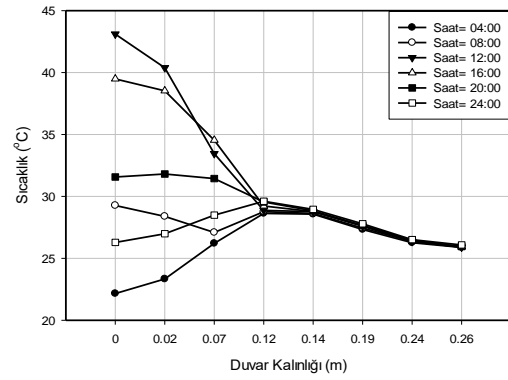
Bu çalışmada ilk önce güneye bakan duvar için sıcaklık dağılımları 5 farklı duvar yapısı göz önünde bulundurularak ayrı ayrı hesaplanmıştır. Şekil 5 yalıtımsız duvar modeli için duvar kalınlığı boyunca zamana bağlı sıcaklık değişimini göstermektedir. Şekil 6 (a – b) Cam yünü ve FDM' nin ortada olduğu duvar modelleri için sıcaklık dağılımını göstermektedir. FDM'nin içte ve dışta olduğu duvar modelleri için ise Şekil 7 (a – b)'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Güneye bakan yalıtımsız duvar modeli için duvar kalınlığı boyunca zamana bağlı sıcaklık değişimi

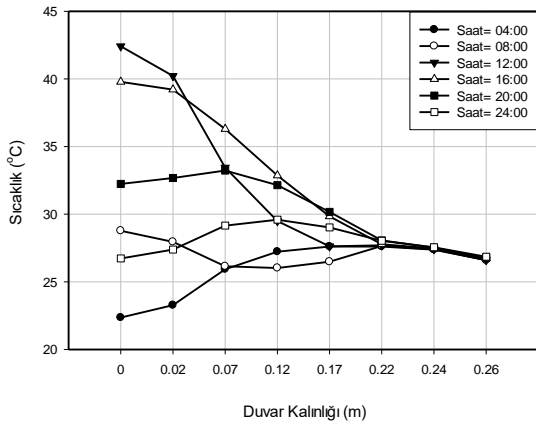


a) Cam yünü ile ortadan yalıtımlı

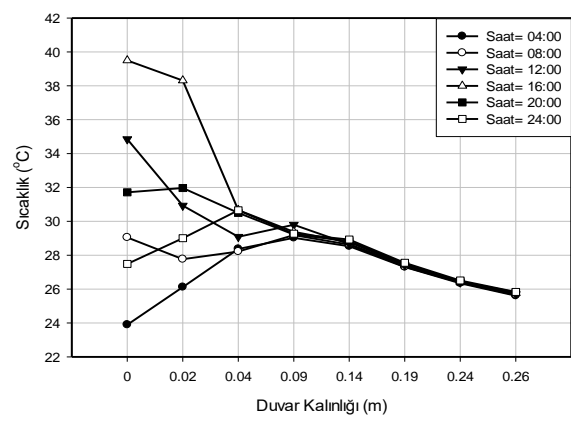


b) FDM ile ortadan yalıtımlı

Şekil 6. Güneye bakan cam yünü yalıtımlı duvar modeli ile FDM ile ortadan yalıtımlı duvar modeli için duvar kalınlığı boyunca zamana bağlı sıcaklık değişimleri



a) FDM ile içten yalıtımlı



b) FDM ile dıştan yalıtımlı

Şekil 7. Güneye bakan FDM ile içten ve dıştan yalıtılmış duvar modelleri için duvar kalınlığı boyunca zamana bağlı sıcaklık değişimleri

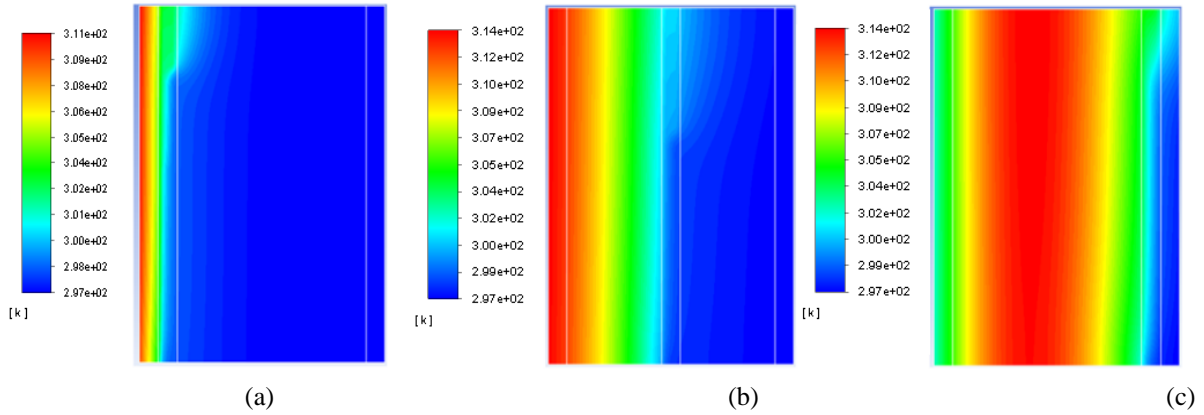
Yalıtımsız duvar hariç diğer tüm duvar modellerinde duvar kalınlığı 26 cm'dir ve grafiklerde 4'er saatlik aralıklarla duvar kalınlığı boyunca sıcaklık dağılımları görülmektedir. Yaz şartları için yalıtımsız duvarda, duvarın kalınlığı boyunca sıcaklık dalgalanmalarının oldukça fazla olduğu görülmektedir. Grafiklere bakıldığında duvarın

dış yüzeyinde minimum sıcaklık saat 04:00'da elde edilirken maksimum sıcaklık saat 12:00'da elde edilmektedir. Bunun nedeni güneye bakan duvarda maksimum güneş ışınımının öğlen saatinde elde edilmesidir. 20:00 ve 24:00 gibi gece saatlerinde sıcaklık duvar içerisinde önce artarken daha sonra azalmaktadır. Bunun nedeni ise sıcaklığın duvar içerisinde gece boyunca depolanması yüzünden dış yüzeyden iç yüzeye doğru giderek azalmasıdır. Yazın güneye bakan duvarın dış yüzeyinde yaklaşık olarak 22oC ile 43oC arasında sıcaklık dalgalanması olduğu görülmektedir. Bu dalgalanma duvarın dış yüzeyinden iç yüzeyine doğru biraz azalsa da, duvarın iç yüzeyinde yeterince azalmadığı görülmektedir. Bu nedenle duvara yalıtım veya FDM uygulanarak dış sıcaklık dalgalanmalarını sönmüleyip iç yüzey yayılımının en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen bu sonuçların ANSYS' de daha önce FDM'siz duvar yapıları için yapılan başka çalışmaların sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür[19-20].

Duvarın ortasına cam yünü yalıtım uygulandığında yalıtım tabakasının etkisiyle sıcaklık dalgalanmalarının oldukça azaldığı görülmektedir. Ancak duvara aynı kalınlıkta FDM yerleştirildiğinde bu azalmanın daha fazla olduğu görülmüştür. Duvarda yalıtım malzemesi olarak faz değiştiren malzeme kullanılması ile duvar içerisindeki sıcaklık salınımları oldukça fazla sönmülenerek birbirine yakın sıcaklık değerleri elde edilmiş ve sıcaklık duvar içerisinde hemen hemen sabit kalmıştır. FDM'nin dışta olması durumunda en az sıcaklık dalgalanmalarının olduğu görülmüştür. Yani FDM'nin duvarın dışına yerleştirilmesinin duvar kalınlığı boyunca sıcaklık dalgalanmalarını en aza indirdiği tespit edilmiştir.

Grafiklere bakıldığında yaz şartlarında güneye bakan yalıtımsız duvarın iç yüzeyinin gün sonunda 27.84°C sıcaklıkta olduğu görülmektedir. FDM'nin dışta ve ortada olduğu duvarların iç yüzey sıcaklıkları ise 25.83°C ve 26.08°C sıcaklıkta olduğu görülmektedir. Yalıtımın konumu olarak FDM'nin dışta olduğu duvar modelinin iç yüzey sıcaklığının daha düşük bir seviyede olduğu ve yalıtımsız duvar ile karşılaştırıldığında yaklaşık olarak 2°C'lik bir fark olduğu görülmektedir.

Güney yönüne bakan duvarda FDM'nin dışta, ortada ve içte olduğu duvar modelleri için 11. saat sonundaki sıcaklık dağılımları Şekil 8'de verilmiştir. FDM'li duvar modellerine ait sıcaklık değişimlerinde erime meydana geldiği zaman sıcaklıktaki değişim şekillerde görülmektedir. Bu değişimler düzenli bir şekilde ilerleyen sıcaklık dağılımının erimenin başlamasıyla dalgalı bir hal almasına sebep olmuştur. Yalıtımsız ve cam yünü ile yalıtılmış duvar modellerinin sıcaklık dağılımlarında erime ve katılaşma olmadığından böyle bir durum gözlemlenmemiştir.



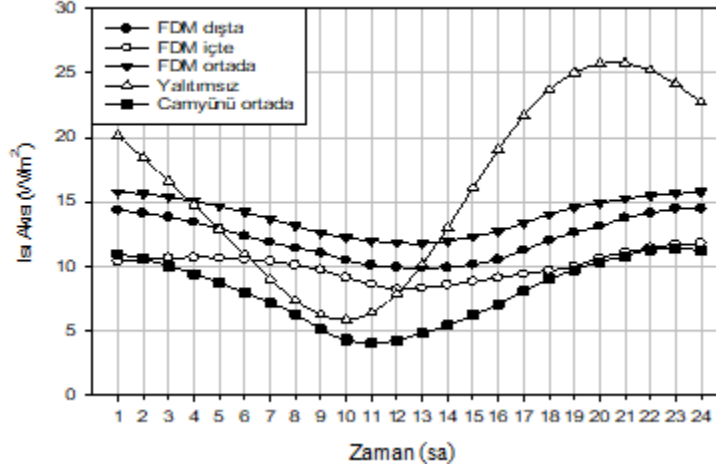
Şekil 8. Duvar boyunca sıcaklık dağılımları (a) FDM'nin dışta olduğu duvar modeli (b) FDM'nin ortada olduğu duvar modeli (c) FDM'nin içte olduğu duvar modeli.

3.3. Soğutma Yükleri

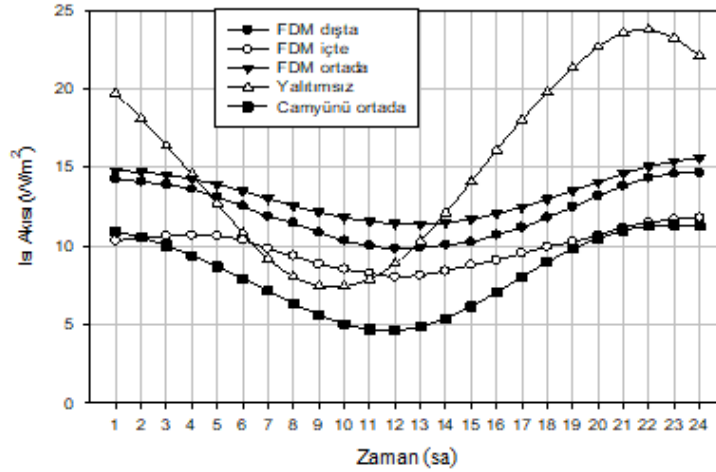
Bu çalışmada ele alınan 5 farklı duvar modeli için ısı akılarının zamana göre değişimleri ise güney ve kuzey yönlendirmeler için sırasıyla Şekil 9 ve 10'da gösterilmiştir.

Duvar iç yüzey ısı akısının maksimum ve minimum değerleri arasındaki fark ısı akısındaki dalgalanmayı verir. Dalgalanma ne kadar az olursa iç yüzeye geçen ısı o kadar az olur. Güneye bakan duvarda ısı akısındaki en fazla dalgalanma grafikten de görüldüğü gibi yalıtımsız duvarda meydana gelirken duvarın yalıtılmasıyla bu dalgalanma azalmaktadır. Yalıtımsız duvar için maksimum ve minimum ısı akısındaki fark 19.91 W/m² olurken, cam yünü yalıtım malzemesinin kullanılmasıyla bu farkın yazın 7.37 W/m² değerine düştüğü görülmüştür. FDM'nin kullanılmasıyla bu dalgalanmanın bir miktar daha azaldığı görülmektedir. FDM'nin dışta, içte ve ortada olmasına göre maksimum ve minimum ısı akısındaki farkın sırasıyla 4.44 , 4.29 ve 4.91 W/m² olduğu ayrıca

görülmektedir. FDM'nin cam yünü ile yapılan yalıtımdan çok daha etkili olduğu görülmüştür. Böylece FDM'nin kullanılmasıyla duvar iç yüzeyinin dış sıcaklık dalgalanmalarından en az etkilendiği görülmektedir.

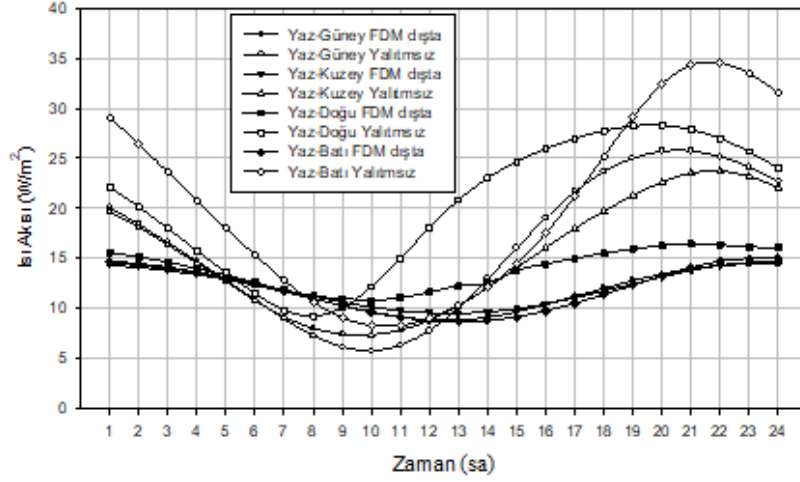


Şekil 9. Güneye bakan farklı duvar modelleri için ısı akısının gün boyunca değişimi



Şekil 10. Kuzeye bakan farklı duvar modelleri için ısı akısının gün boyunca değişimi

Şekil 11 bütün duvar yönlerine göre yalıtımsız ve FDM'nin dışta olduğu duvar modelleri için ısı akısının zamana göre değişimini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi tüm yönlendirmeler için FDM'li duvarın maksimum ve minimum ısı akıları arasındaki farkın yalıtımsız duvara göre daha düşük olduğu görülmektedir. Yalıtımsız duvar için bu fark bütün yönlendirmelere göre 17-28 W/m² arasında değişirken FDM ile yalıtılmış duvarda söz konusu farkın 5-8 W/m² arasında değiştiği görülmüştür. Yalıtımsız duvarda ısı kazancı açısından yönlendirmenin etkisi büyük olurken FDM'li duvarda bu etkinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 11. Güney, kuzey, doğu ve batı yönlerine bakan yalıtımsız ve FDM'nin dışta olduğu duvar modellerine ait ısı akılarının karşılaştırılması

3.4. Faz Kayması ve Sönüm Oranları

Binaların dış duvarlarında ısı depolama kapasiteleri bakımından faz kayması ve sönüm oranı önemli parametrelerdir. Faz kayması iç yüzey sıcaklığı ile eşdeğer dış sıcaklığın maksimum olduğu zaman aralarındaki fark olarak adlandırılır. Sönüm oranı ise bu işlem boyunca genlikte meydana gelen azalma miktarıdır, başka bir deyişle iç yüzey sıcaklığının genliğinin eşdeğer çevre sıcaklığının genliğine oranı olarak adlandırılmaktadır. Faz kayması ve sönüm oranı, yapılarda ısı depolama kapasitelerini hesaplayabilmek için önemli belirleyicilerdir [14].

Çok katmanlı duvar yapılarında katmanların yeri ve boyutlarının faz kayması ve sönüm oranı değerleri üzerine etkisi vardır [21]. Duvarın ısı depolama kapasitesinin yüksek olması, faz kaymasını artırır ve sönüm oranını ise azaltır. İç mekan konforu açısından sönüm oranının küçük, faz kaymasının ise büyük değerlerde olması gerekmektedir. Tablo 7'de yaz şartlarında güney ve kuzeye bakan tüm duvar modellerine ait faz kayması ve sönüm oranı değerleri yer almaktadır. Tablo 7'den görüldüğü üzere FDM ile yalıtılmış duvar modellerine ait değerlerin yalıtımsız ve cam yünü ile yalıtılmış duvar modeline göre ısı depolama kapasitesi açısından daha iyi olduğu söylenebilir.

Tablo 7. Güney ve kuzeye bakan tüm duvar modellerine ait faz kayması ve sönüm oranı değerleri

Duvar yapısı	Güney		Kuzey	
	Faz Kayması (sa)	Sönüm Oranı	Faz Kayması (sa)	Sönüm Oranı
Yalıtımsız	6	0.113	6	0.116
Cam yünü ortada	7	0.103	7	0.108
FDM dışta	11	0.032	10	0.033
FDM içte	9	0.029	10	0.028
FDM ortada	11	0.038	10	0.037

4. Sonuçlar

Bu çalışmada yalıtım yerine FDM kullanmanın soğutma yüküne etkisi dinamik dış iklim şartları göz önünde bulundurularak ve tüm duvar yönlendirmeleri için ANSYS'de sayısal olarak araştırılmıştır. Dış yüzeyin 24 saat boyunca değişen güneş ışınımı ve dış ortam sıcaklıklarına maruz kaldığı göz önünde bulundurularak gerçek şartlara yakın bir analiz gerçekleştirilmiştir. Seçilen FDM'nin uygun bir erime ve katılaşma sıcaklığı aralığında olması gerekmektedir. Bu yüzden bu çalışmada yaz şartlarında 28-30 °C aralığında eriyen parafin bazlı RT-27 kullanılmıştır. Sonuç olarak, duvara yalıtım yerine aynı kalınlıkta FDM uygulanarak tüm duvar yönlendirmeleri için dış sıcaklık dalgalanmaları sönümlenip iç yüzeye yayılımının en aza indirilmesi sağlanmıştır. Ayrıca duvara

FDM uygulanarak maksimum faz kayması ve minimum sönüm oranı açısından duvarın ısı depolama kapasitesinin de arttığı görülmüştür.

Kaynaklar

- [1] Konuklu Y, Paksoy HÖ. “Faz değiştiren maddeler ile binalarda enerji verimliliği”. X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 919-930, İzmir, Türkiye, 13-16 Nisan 2011.
- [2] Sun X, Zhang Y, Xie K, Medina MA. “A parametric study on the thermal response of a building wall with a phase change material (PCM) layer for passive space cooling”. *Journal of Energy Storage*, 47, 103548, 2022.
- [3] Kürklü A, Wheldon AE, Hadley P. “Bir faz değişim maddesinin model bir serada dondan koruma amacı ile kullanılması”. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3(2): 359-363, 1997.
- [4] Zhang G, Xiao N, Wang B, Razaqpur AG. “Thermal performance of a novel building wall incorporating a dynamic phase change material layer for efficient utilization of passive solar energy”. *Construction and Building Materials*, 317, 126017, 2022.
- [5] Tian G, Lv H, Huang J, Liu P, Feng W. “Experimental study on the heat transfer characteristics of different walls with phase change materials in summer”. *Journal of Building Engineering*, 44, 103354, 2021.
- [6] Cevik M. Faz Değiştiren Maddelerle Duvar Isıl Yalıtımının Deneysel Olarak Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, 2012.
- [7] Tokuç A. Faz Değişim Malzemelerinin Isıl Enerji Depolama Amacıyla Yapı Elemanı Üretiminde Kullanılması. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye, 2013.
- [8] Örengül F. Gizli Isı Depolamalı Tavan Isıl Yalıtımının Deneysel Olarak Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, 2010.
- [9] Konuklu Y. Mikrokapsüllemiş Faz Değiştiren Maddelerde Termal Enerji Depolama ile Binalarda Enerji Tasarrufu. Doktora tezi, Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye, 2008.
- [10] Kurt S. Yeni Nesil Bina Malzemeleri için Faz Değiştiren Madde Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye, 2012.
- [11] Quanying Y, Ran H and Lisha L. “Experimental study on the thermal properties of the phase change material wall formed by different methods”. *Solar Energy*, 3099-3102, 2012.
- [12] Hasan MI, Basher HO, Shdhan AO. “Experimental investigation of phase change materials for insulation of residential buildings”. *Sustainable Cities and Society*, 36 (2018) 42-58, 2018.
- [13] Kandasamy R, Wang QX and Mujumdar SA. “Application of phase change materials in thermal management of electronics”. *Applied Thermal Engineering*, 27, 2822-2832, 2007.
- [14] Özel M. Duvar Yüzeylerinde Periyodik Sıcaklık Değişimi Olan Binalarda Isı Kazanç ve Kayıpların Minimum Yapacak Yöntemlerin Araştırılması. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, 2003.
- [15] Özel, M. 2022. Impact of glazing area on thermal performance of buildings, *International Journal of Ambient Energy*, Vol. 43, No. 1, 2039-2055.
- [16] Daloğlu A. “Isı Yalıtımında Faz Değiştiren Malzeme Kullanımı”. X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, Türkiye, 2011.
- [17] Cengel Yunus A and Afshin J Ghajar. "Heat and mass transfer." A practical approach 2007.
- [18] Okcu M. Faz Değiştiren Maddelerde Erime ve Katılaşma Sürecinin Sayısal Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, 2011.
- [19] M. Özel, N. İlgin, (2013). “Periyodik Sınır Şartlarına Maruz Kalan Çok Katmanlı Duvarlarda Sıcaklık Dağılımının ANSYS’de Analizi”, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, Sayı 132, 14:49, 27-32.
- [20] N. İlgin, M. Özel ve K. Pıhtılı, “Yalıtımlı Duvarlarda Sıcaklık Dağılımının ANSYS’ te Çözümü” IV. Ege Enerji Sempozyumu 21-23 Mayıs 2008 İzmir.
- [21] Özel M, Çakmak FA, Beyazıt N. “Faz değiştiren malzemeli duvarlarda sıcaklık dağılımının nümerik analizi”. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 12(5), 803-810, 2021