

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN FARKLI İKLİM
BÖLGELERİNDE BULUNAN BİNALARDAKİ ENERJİ
TASARRUFU ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**

FEYZA BİLGİN

KOCAELİ 2017

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN FARKLI İKLİM
BÖLGELERİNDE BULUNAN BİNALARDAKİ ENERJİ
TASARRUFU ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ

FEYZA BİLGİN

Doç. Dr. Müslüm ARICI
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Hasan Rıza GÜVEN
Jüri Üyesi, İstanbul Üniversitesi
Doç. Dr. Hasan KARABAY
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih: 21.06.2017



ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, faz değıştiren malzemeleri bina duvarına entegre ederek, termal enerji depolama ile ısıtma ve soğutma koşullarında binalarda enerji tasarrufunu arttırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Tezimin oluşmasında bilgisi, tecrübesi ve önerileri ile her zaman yanımda olan Sayın Hocam Doç. Dr. Müslüm ARICI' ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmalarım sırasında büyük fedakârlık gösteren ve benim için hayatı kolaylaştıran sevgili Anneme, Babama ve Kardeşime daima yanımda olmaları dileğiyle teşekkür ederim.

Haziran – 2017

Feyza BİLGİN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iii
TABLOLAR DİZİNİ	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER	2
1.1. Termal Enerji Depolama	2
1.2. Faz Değiştiren Malzemeler	4
1.3. Literatür Araştırması	5
2. PROBLEMİN TANITILMASI VE SAYISAL YÖNTEM	10
2.1. Problemin Tanıtılması	10
2.2. Sayısal Yöntem	15
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	21
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	34
KAYNAKLAR	36
EKLER	41
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	44
ÖZGEÇMİŞ	45

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Termal enerji depolama sistemlerinin sınıflandırılması.....	2
Şekil 1.2.	Faz değıştiren malzemelerin sınıflandırılması.....	4
Şekil 2.1.	Problemin şematik gösterimi, a) FDM'siz duvar, b) FDM dış sıva ile beton arasında, c) FDM betonun ortasında, d) FDM iç sıva ile beton arasında.....	10
Şekil 2.2.	Isıtma iklim koşulları, a) Adana, b) Batman, c) Artvin, d) Ağrı.....	14
Şekil 2.3.	Soğutma iklim koşulları, a) Adana, b) Batman, c) Artvin, d) Ağrı.....	15
Şekil 2.4.	Yaklaşım hatası analizi.....	17
Şekil 2.5.	Kararlılık analizi.....	17
Şekil 2.6.	Sayısal modelin doğrulanması.....	18
Şekil 2.7.	Enerji tasarrufu şematik gösterimi.....	19
Şekil 2.8.	Genlik küçültme faktörü ve zaman gecikmesi şematik gösterimi.....	20
Şekil 3.1.	Isıtma iklim koşulunda Adana için duvardan geçen ısı miktarı.....	24
Şekil 3.2.	Isıtma iklim koşulunda enerji tasarrufları, a) Adana, b) Batman, c) Artvin, d) Ağrı.....	25
Şekil 3.3.	Soğutma iklim koşulunda enerji tasarrufları, a) Adana, b) Batman, c) Artvin, d) Ağrı.....	26
Şekil 3.4.	Isıtma iklim koşulunda iç yüzey sıcaklıkları, a) Adana, b) Batman, c) Artvin, d) Ağrı.....	28
Şekil 3.5.	Soğutma iklim koşulunda iç yüzey sıcaklıkları, a) Adana, b) Batman, c) Artvin, d) Ağrı.....	29
Şekil 3.6.	Isıtma iklim koşulunda Adana için RT18HC malzemesinin dış sıva ile beton arasında olması durumunda, a) dış yüzey sıcaklık, b) iç yüzey sıcaklık değışimi.....	31
Şekil 3.7.	Isıtma iklim koşulunda Adana için FDM'siz duvarda, a) dış yüzey sıcaklık, b) iç yüzey sıcaklık değışimi.....	31

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. Malzemelerin termofiziksel özellikleri.....	11
Tablo 2.2. ASHRAE sabitleri.....	13
Tablo 2.3. Enlem ve boylamlar.....	14
Tablo 3.1. FDM dış sıva ile beton arasında ise faz değişimi durum çizelgesi.....	21
Tablo 3.2. FDM betonun ortasında ise faz değişimi durum çizelgesi.....	22
Tablo 3.3. FDM iç sıva ile beton arasında ise faz değişimi durum çizelgesi.....	22
Tablo 3.4. Maksimum enerji tasarrufları.....	27
Tablo 3.5. Genlik küçültme faktörü ve zaman gecikmesi.....	32

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Belirgin güneş radyasyonu sabiti, (W/m^2)
B	: Atmosferik sönümleme katsayısı
C	: Gökyüzü yayılım faktörü
C_p	: Özgül ısı, (J/kgK)
dT	: Sıcaklık değişimi, ($^{\circ}C$)
E	: Toplam enerji miktarı, ($Wh/m^2gün$)
E_s	: Enerji tasarrufu, ($Wh/m^2gün$)
f	: Sıvı oranı
g	: Gün sayısı
h	: Isı taşınım katsayısı, (W/m^2K)
I	: Güneş ışıınımı, (W/m^2)
I_{bn}	: Direkt güneş ışıınımı, (W/m^2)
I_d	: Difüz güneş ışıınımı, (W/m^2)
i	: Konum indisi
j	: Zaman indisi
k	: Isı iletim katsayısı, (W/mK)
L_H	: Erime ısısı, (kJ/kg)
m	: Kütle, (kg)
n	: Yılın günü
Q	: Duvardan geçen ısı miktarı, (W/m^2)
Q_{depo}	: Depolanan ısı miktarı, (kJ)
t	: Zaman, (saat)
t_d	: Gün uzunluğu, (saat)
t_e	: Zaman eşitliği, (saat)
t_{max}	: Maksimum sıcaklığının olduğu zaman, (saat)
t_{min}	: Minimum sıcaklığının olduğu zaman, (saat)
t_s	: Güneş saati, (saat)
t_{Ti}^{max}	: İç yüzey maksimum sıcaklığın olduğu zaman, (saat)
t_{To}^{max}	: Dış yüzey maksimum sıcaklığın olduğu zaman, (saat)
t_y	: Yerel saat, (saat)
T	: Sıcaklık, ($^{\circ}C$)
T_d	: Dış hava sıcaklığı, ($^{\circ}C$)
T_i	: İç yüzey sıcaklığı, ($^{\circ}C$)
T_i^{max}	: İç yüzey maksimum sıcaklığı, ($^{\circ}C$)
T_i^{min}	: İç yüzey minimum sıcaklığı, ($^{\circ}C$)
T_{ilk}	: Başlangıç sıcaklığı, (K)
T_m	: Erime sıcaklığı, ($^{\circ}C$)
T_{max}	: Maksimum sıcaklık, ($^{\circ}C$)
T_{min}	: Minimum sıcaklık, ($^{\circ}C$)
T_o	: Dış yüzey sıcaklığı, ($^{\circ}C$)
T_o^{max}	: Dış yüzey maksimum sıcaklığı, ($^{\circ}C$)
T_o^{min}	: Dış yüzey minimum sıcaklığı, ($^{\circ}C$)
T_{oda}	: Oda sıcaklığı, ($^{\circ}C$)

T_{sky}	: Gökyüzü sıcaklığı, ($^{\circ}C$)
T_{son}	: Son sıcaklık, (K)
w	: Saat açısı, ($^{\circ}$)
α	: Isı yayılım katsayısı, (m^2/s)
α_G	: Güneş ışıınımı yutma oranı
δ	: Deklinasyon açısı, ($^{\circ}$)
Δt	: Zaman adımı, (s)
Δx	: Konum adımı, (m)
ε	: Işınım neşretme katsayısı
ε	: Yüzde bağıl hata, (%)
λ_l	: Yerel boylam, ($^{\circ}$)
λ_s	: Standart boylam, ($^{\circ}$)
ρ	: Yoğunluk, (kg/m^3)
σ	: Stefan-Boltzmann sabiti, (W/m^2K^4)
τ	: Fourier sayısı
ϕ	: Enlem, ($^{\circ}$)
ϕ_z	: Zenit açısı, ($^{\circ}$)

Kısaltmalar

DF	: Decrement Factor (Genlik Küçültme Faktörü)
FDM	: Faz Değıştiren Malzeme
TL	: Time Lag (Zaman Gecikmesi), (saat)

FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN FARKLI İKLİM BÖLGELERİNDE BULUNAN BİNALARDAKİ ENERJİ TASARRUFU ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, 12 farklı faz değıştiren malzemenin termofiziksel özelliklerinin ve malzemenin bina duvarı içerisindeki konumunun enerji tasarrufu, genlik küçültme faktörü ve zaman gecikmesi üzerindeki etkisi bir boyutlu açık sonlu farklar yöntemi kullanılarak sayısal olarak incelendi. İklim koşulu olarak, ısıtma durumunda 21 Ocak, soğutma durumunda 21 Temmuz günleri seçildi ve Türkiye'nin farklı iklim bölgesinden seçilen şehirlere ait dış hava sıcaklığı ve güneş ışıınının günlük değışimi kullanıldı.

Bu çalışmanın sonuçları, faz değıştiren malzemenin termofiziksel özelliklerinin, malzemenin duvar içerisindeki konumunun ve iklim koşullarının, enerji tasarrufu, genlik küçültme faktörü ve zaman gecikmesi üzerinde etkili olduğunu gösterdi. Maksimum enerji tasarrufu sağlamak için iklim koşullarına uygun erime sıcaklığında malzemelerin seçilmesi gerektiğı ve seçilen malzemelerin duvar içerisindeki konumunun belirlenmesinin önemli olduğu belirlendi. Isıtma ve soğutma koşullarında faz değıştiren malzemelerin betonun ortasına ya da iç sıva ile beton arasına yerleştirilmesine kıyasla dış sıva ile beton arasına yerleştirilmesi ile ciddi miktarda enerji tasarrufu sağlayabileceğı sonucuna varıldı. Genel olarak, ısıtma koşulunda iç yüzey sıcaklığının arttığı, soğutma koşulunda ise iç yüzey sıcaklığının azaldığı belirlendi ve bu durumun termal konforu arttırdığı sonucuna varıldı. Ayrıca, faz değıştiren malzemelerin erime ve katılaşma süresi boyunca sıcaklığının erime sıcaklığında sabit kalması nedeniyle genlik küçültme faktörünün azaldığı ve zaman gecikmelerinin arttığı sonucuna varıldı.

Anahtar kelimeler: Enerji Tasarrufu, Faz Değıştiren Malzemeler, Genlik Küçültme Faktörü, Termal Enerji Depolama, Zaman Gecikmesi.

A NUMERICAL INVESTIGATION OF EFFECT OF VARIOUS PHASE CHANGE MATERIALS ON THE ENERGY SAVING IN BUILDINGS CONSIDERING DIFFERENT CLIMATE ZONES

ABSTRACT

In this study, 12 different phase change materials were analyzed numerically in order to investigate the effect of their thermophysical properties and their positions in the building wall on energy saving, decrement factor and time lag. One-dimensional explicit finite difference method was used. Climatic conditions were selected as 21st January and 21st July for heating and cooling condition, respectively. The daily variation of the outside air temperature and the solar radiation of the selected cities from different climate regions of Turkey were used.

The result of the current study indicated that thermophysical properties of phase change materials, their positions in the wall and climatic conditions have significant effect on energy saving, decrement factor and time lag. To ensure maximum energy savings, materials and their locations must be selected appropriately. The materials must have a melting temperature appropriate to the climatic conditions and the position of the selected materials in the wall must be suitable. Under heating and cooling conditions, it has been concluded that a considerable amount of energy can be saved by changing the position of the phase-change material within the wall. Placing the material between the outer plaster and concrete provides more energy savings compare to placing it in center of the concrete or placing it between the inner plaster and the concrete. In general, it was observed that inside surface temperature increased in heating conditions and decreased in cooling conditions. Hence, it was concluded that thermal comfort can be enhanced considerably. As a consequence of the using phase change material; the decrement factor decreased and the time lag increased.

Keywords: Energy Saving, Phase Change Materials, Decrement Factor, Thermal Energy Storage, Time Lag.

GİRİŞ

Enerji ihtiyacı tüm dünya ülkelerinin gündeminde bulunan bir konudur. Artan nüfus ile birlikte hızlı kentleşme süreci enerji tüketimini arttırmaktadır. Bu nedenle, artan enerji ihtiyacını karşılamak için enerji tasarrufu ve verimliliği konuları ön plana çıkmaktadır. Bununla birlikte, enerji tüketiminin yaklaşık %35-40'ının binalarda tüketilmesi, binalarda enerji tasarrufunu arttıran teknolojilerin önemini her geçen gün arttırmaktadır.

Bu çalışmada, faz değiştiren malzemeleri bina duvarında kullanarak, termal enerji depolama ile binalarda enerji tasarrufunu arttırmak hedeflenmektedir. Bu amaçla çalışmada, Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinden seçilen şehirler (Adana, Batman, Artvin ve Ağrı) için ısıtma ve soğutma koşullarında 12 farklı faz değiştiren malzemenin termofiziksel özelliklerinin ve malzemelerin bina duvarı içerisinde (dış sıva ile beton arasında, betonun ortasında ve iç sıva ile beton arasında olmak üzere) 3 farklı konuma yerleştirilmesinin enerji tasarrufu, genlik küçültme faktörü ve zaman gecikmesi üzerindeki etkisi bir boyutlu açık sonlu farklar yöntemi kullanılarak sayısal olarak incelenmektedir.

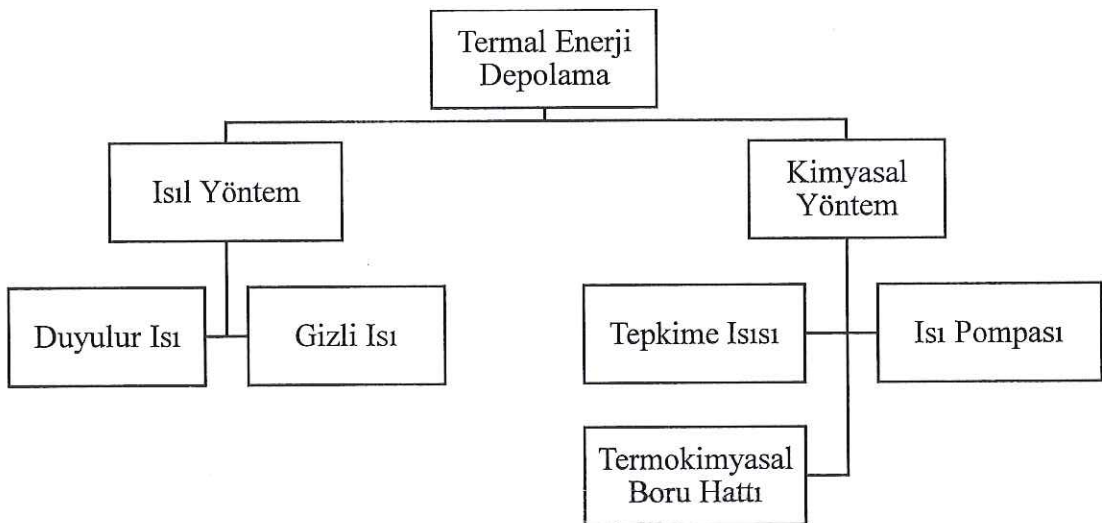
1. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde, öncelikle termal enerji depolama kavramı tanımlandı, daha sonra faz değiştiren malzemeler ve türleri hakkında bilgi verildi. Sonunda ise literatür çalışmalarına değinildi.

1.1. Termal Enerji Depolama

Termal enerji depolama, daha sonra kullanılmak üzere yüksek veya düşük sıcaklıktaki enerjinin geçici bir süreyle depolanması şeklinde tanımlanır [1]. Termal enerji depolama sistemleri, enerji tasarrufunu artırmak için yarar sağlayan bir teknolojidir. Termal enerji depolama sistemleri üç temel aşamadan oluşmaktadır. Bunlar; depolama sistemine enerjinin yüklenmesi, yüklenen enerjinin depolanması ve depolanan enerjinin ihtiyaç duyulan zaman içerisinde kullanılması şeklinde sıralanır [2].

Termal enerji depolamak için iki yol vardır; duyulur ısıyı ve gizli ısıyı kapsayan ısıl yöntem ve tepkime ısını, ısı pompasını ve termokimyasal boru hattını kapsayan kimyasal yöntemdir. Bu yöntemler birim hacimde depolayabildikleri enerji bakımından ayrılır [3]. Termal enerji depolama sistemlerinin sınıflandırılması Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Termal enerji depolama sistemlerinin sınıflandırılması [4]

Duyulur ısı depolama, malzeme katı ya da sıvı fazda iken sıcaklığının artırılması veya azaltılması ile enerji depolanması şeklinde tanımlanır. Duyulur ısı depolamada depolanan ısı miktarı malzemeye, malzemenin özgül ısısına ve sıcaklığında meydana gelen değişime bağlıdır ve depolanan ısı miktarı Denklem (1.1)'deki gibi;

$$Q_{\text{depo}} = \int_{T_{\text{ilk}}}^{T_{\text{son}}} mC_p dT \quad (1.1)$$

hesaplanır [4]. Termal enerjiyi duyulur ısı olarak depolamak için en yaygın kullanılan malzeme sudur. Ayrıca, seramik (çimento, beton vb.), doğal taş (mermer, granit, kil, kumtaşı vb.), ve polimer malzemeler yaygın olarak kullanılır. Böylece, uygun termofiziksel özelliklere sahip endüstriyel proses atıkları, termal enerji depolamak için uygun ürün haline gelir. Duyulur ısı depolamanın iki temel avantajı vardır; ucuzdur ve zehirli malzeme kullanımından kaynaklanan risklerden uzaktır. Duyulur ısı depolamanın dezavantajı ise; binalarda enerji depolanması için istenen ısı miktarına bağlı olarak gereken hacmin yüksek olmasıdır [5].

Gizli ısı depolama, malzeme katı fazdan sıvı faza, sıvı fazdan katı faza şeklinde bir faz değişimine uğradığında ısı emilimine ya da serbest bırakılmasına dayanan enerji depolanması şeklinde tanımlanır [4]. Diğer ısı depolama yöntemlerine nazaran, gizli ısı depolama yüksek enerji depolama kapasitesinin olması ve faz değiştirme esnasında sabit bir sıcaklıkta ısıyı depolayabilmesi nedeniyle tercih edilen bir yöntemdir. Binalarda enerji depolanması için duyulur ısı depolama yöntemi ile kıyaslandığında ısı depolama kapasitesi yüksektir ve depolama yapmak için gereken hacim daha küçüktür [5]. Gizli ısı depolamada depolanan ısı miktarı kullanılan malzemeye, malzemenin erime ısısına ve erimenin meydana geldiği sıcaklığa bağlıdır ve depolanan ısı miktarı Denklem (1.2)'deki gibi;

$$Q_{\text{depo}} = \int_{T_{\text{ilk}}}^{T_m} mC_p dT + mL_H + \int_{T_m}^{T_{\text{son}}} mC_p dT \quad (1.2)$$

hesaplanır [4].

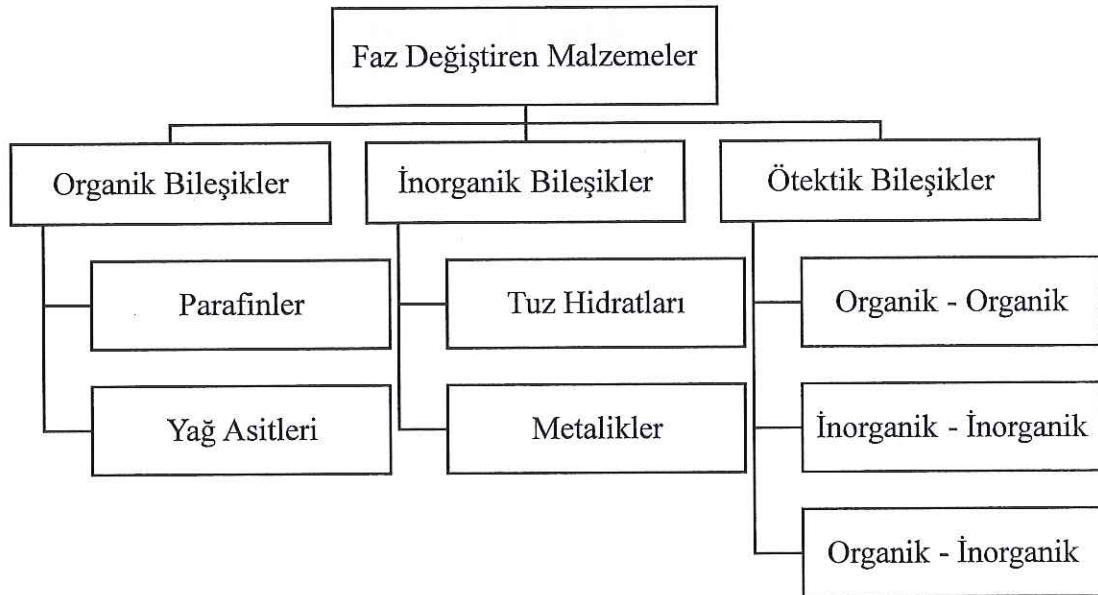
Termal enerjiyi gizli ısı olarak depolamak için faz değiştiren malzeme kullanılır. Her malzeme kendi avantajlarını ve dezavantajlarını sunar, bu nedenle uygulama şartlarına uygun bir malzeme seçimi yapılması gerekir [5].

1.2. Faz Değiştiren Malzemeler

Malzemenin faz değişimi sırasında meydana gelen gizli ısıdan faydalanarak termal enerji depolanmasında kullanılan malzemeler faz değiştiren malzemeler olarak tanımlanır. Faz değiştiren malzemeler sabit sıcaklıkta depolama imkânı sunduğundan faz değiştirme sıcaklığına bağlı olarak bina yapılarında hem ısıtma hem de soğutma amaçlı kullanılır [6].

Gizli ısı depolamak için kullanılan faz değiştiren malzemelerden, erime ısısının ve özgül ısısının yüksek olması, uygulama şartlarına uygun erime sıcaklığının olması, kimyasal bir kararlılığının olması, korozif yapıda olmaması, tehlikeli (yanıcı, zehirli vb.) olmaması, kristalleşme probleminin olmaması ve bozulma olmadan kullanılabilir olması, katılaşma sırasında küçük hacim değişiminin olması, yüksek termal iletkenliğe sahip olması, kolay temin edilebilir ve düşük maliyette olması beklenmektedir [7].

Faz değiştiren malzemeler organik, inorganik ve ötektik olmak üzere üç temel gruba ayrılır ve faz değiştiren malzemelerin sınıflandırılması şekil 1.2’de gösterilmiştir.



şekil 1.2. Faz değiştiren malzemelerin sınıflandırılması [8]

Organik bileşikler, kimyasal olarak karardır, aşırı soğuma olmadığı için kristalleşme problemi yoktur, korozif yapıda değildir, tehlikeli (yanıcı, zehirli vb.) değildir ve yüksek erime ısısına sahiptir [9].

İnorganik bileşikler, yüksek erime ısısına ve iyi bir termal iletkenliğe sahiptir, tehlikeli (yanıcı, zehirli vb.) değildir ve düşük maliyettedir. Bununla birlikte, çoğu metale karşı korozyon yapıcıdır, aşırı soğumaya uğrar ve kristalleşme problemleri vardır [9].

Ötektik bileşikler, genelde belirgin erime sıcaklıklarına sahiptir ve hacimsel depolama yoğunluğu organik bileşiklere göre daha yüksektir. Bununla birlikte, termofiziksel özelliklerine ilişkin sınırlı veriler mevcuttur [43].

1.3. Literatür Araştırması

Faz değiştiren malzemeler ile termal enerji depolama uygulamaları oldukça çeşitlilik göstermektedir. Güneş enerjisinin termal enerji olarak depolanmasında [10-15], bina yapılarında ısıtma veya soğutma amacıyla enerji tasarrufunu sağlamak için [16-20], buz depolarında (soğutma) [21-24], sıcak su depolarında (ısıtma) [25-29], gıdaların termik korumasında (ulaşım, ticaret vb.) ve tarımsal sanayisinde (süt ürünleri, seralar vb.) [30], elektronik cihazların termik korumasında kullanılır [31].

Son yıllarda, ısıtma ve soğutma uygulamalarında enerji tüketimini azaltmak için bina yapılarına faz değiştiren malzemeleri ilave etmek ve bu malzemelerin yüksek termal kütlelerinin oluşundan faydalanmak sıklıkla kullanılan bir yöntem haline gelmiştir [3].

Koschenz ve Lehmann [32] yaptıkları çalışmada yenilenmiş binalar için tavan paneli geliştirerek 50 mm kalınlığında mikrokapsüllenmiş parafin ilave etmişlerdir. Hem sayısal bir model geliştirmişler hem de deneysel çalışma yürütmüşlerdir. Sayısal incelemede iklim koşulu olarak sıcaklığın periyodik olarak değişimini varsayan bir model kullanmışlardır. Sonuçlara göre; mikrokapsüllenmiş parafinin standart bir ofis binasında yaklaşık 290 Wh/m²gün termal enerji depoladığı ve bunun konfor sıcaklığını korumak için yeterli olduğunu elde etmişlerdir.

Shilei ve arkadaşlarının [33] iki farklı test odasında yaptıkları çalışmada alçı panolara faz değiştiren malzeme ekleyerek ve eklemeyen bir duvar kaplaması oluşturmuşlardır. Çin'de kış aylarında üç gün süreyle deneysel olarak incelemişlerdir. Her iki oda için maksimum oda sıcaklıkları karşılaştırıldığında duvar kaplamasında faz değiştiren malzeme bulunan odanın sıradan odaya göre 1,15°C

daha düşük olduğu ve güney duvar boyunca ısı geçişinin yaklaşık 8 W/m² daha az olduğu sonucuna varmışlardır.

Ahmad ve arkadaşlarının [34] 5 cm'den daha az duvar kalınlığı ile yüksek depolama kapasitesi elde edebilmek ve yatırım masraflarını en aza indirmek amacıyla yaptıkları çalışmada parafin granlle doldurulmuş polikarbonat panel, PEG 600 ile doldurulmuş polikarbonat panel, PEG 600 ile doldurulmuş PVC panel olmak üzere üç tip panel deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen veriler, sayısal olarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, PEG 600 ile doldurulmuş PVC panelin kullanılabilir olduğunu göstermiştir.

Cabeza ve arkadaşlarının [35] binalarda enerji tasarrufu sağlamak amacıyla yaptıkları çalışmada erime sıcaklığı 26°C, erime ısısı 110 kJ/kg olan mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzemeyi betona ilave etmişlerdir. Faz değiştiren malzeme içeren beton ile faz değiştiren malzeme içermeyen beton Fransa iklim şartlarında deneysel olarak incelenmiştir. Faz değiştiren malzeme içeren betondaki maksimum sıcaklığın içermeyen betona kıyasla 2 saatlik bir gecikmeye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, 6 ay sonrasında kullandıkları faz değiştiren malzemeyi incelediklerinde malzeme özelliklerinde hiçbir kayıp tespit etmediklerini rapor etmişlerdir.

Halford ve Boehm [36] akşam saatlerindeki klima yükünü geciktirmek amacıyla yaptıkları çalışmada kapsüllenmiş tuz hidratı kullanılmışlardır ve iklim koşulu olarak Amerika'nın ilkbahar ve yaz ayları için hem ortalama genlik hem de ortalama sıcaklıklar baz alınarak sinüzoidal ortam sıcaklığı fonksiyonu modellemişlerdir. Bir boyutlu açık (explicit) sonlu farklar yöntemi kullanmışlardır. Teorik olarak elde edilen sonuçlara göre, faz değiştiren malzemenin kullanımıyla önemli bir yük kayması sağladıklarını belirtmişlerdir. İç duvar için seçilen sıcaklık rejimine bağlı olarak, beklenen sıcaklık aralığının birçoğunda maksimum %5-11 erimenin gerçekleştiğini ve bu durumun, tepe noktasında %11-25'lik bir azalmaya karşılık geldiğini belirtmişlerdir. Faz değişimi olmayıp sadece yalıtım durumunda %19-57'lik bir düşmenin olabileceğini tespit etmişlerdir.

Pasupathy ve Velraj [37] bir binanın çatısında termal yönetim sağlamak amacıyla yaptıkları çalışmada organik, inorganik ve her ikisinin iki katmanlı olarak kullanıldığı faz değiştiren malzemeleri kullanarak deneysel ve sayısal analizler

yapmışlardır. Çalışmalarında, organik malzeme olarak erime sıcaklığı 32°C, erime ısısı 264 kJ/kg olan, inorganik malzeme olarak erime sıcaklığı 26°C, erime ısısı 188 kJ/kg olan faz değiştiren malzemeler kullanılmıştır. Çalışma, bir yıl boyunca analiz edilmiştir ve tek katmanlı faz değiştiren malzemenin kullanılmasının, Mayıs ve Kasım aylarında diğer aylara nazaran olumsuz etki gösterdiğini belirtmişlerdir. Sıcaklığın korunması için iki katmanlı faz değiştiren malzemenin kullanılmasını önermişlerdir.

Xiao ve arkadaşlarının [38] pasif güneş odasında enerji depolamak amacıyla yaptıkları çalışmada faz değiştiren malzemenin termofiziksel özelliklerini optimize etmek için teorik model geliştirmişlerdir. Sonuçlara göre; optimum erime sıcaklığının, ortalama iç ortam sıcaklığına ve absorbe edilen radyasyona bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Kuznik ve arkadaşlarının [39] faz değiştiren malzemelerin kalınlığını optimize etmek amacıyla yaptıkları çalışmada bir ticari yazılım (CODYMUR) kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada, faz değiştiren malzemenin erime sıcaklığı 22°C seçilmiştir. Temmuz ayında Paris için 24 saatlik bir periyod içinde dış hava sıcaklığını sinüzoidal olarak incelemişlerdir. Depolanan enerji miktarı göz önüne alındığında soğutma uygulamalarında kullanılacak faz değiştiren malzemelerin optimum kalınlığının iç ortam sıcaklığına bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. 10 mm kalınlığında faz değiştiren malzemenin iç ortam sıcaklığı 18-25°C olması durumunda binanın termal ataletini iki katına çıkardığını ve depolanan enerji miktarının bina odalarının aşırı ısınmasını engellediğini belirlemişlerdir. Ayrıca, sıcaklık dalgalanmalarının azaldığı sonucuna varmışlardır.

Athienitis ve arkadaşlarının [40] binalarda enerji tasarrufu sağlamak amacıyla yaptıkları çalışmada faz değiştiren malzemeleri bina yapısı içerisinde kullanarak deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Faz değiştiren malzeme kullanılmasıyla gündüz boyunca maksimum oda sıcaklığının yaklaşık 4°C düştüğü ve gece ısıtma yükünün önemli ölçüde azaldığı sonucuna varmışlardır.

Huang ve arkadaşlarının [41] farklı faz değiştiren malzemelerin ısıl performans etkisini tespit etmek amacıyla yaptıkları çalışmada İngiltere'nin gerçek iklim verilerini kullanmışlardır ve kış mevsimi için 21 Ocak, yaz mevsimi için 21 Temmuz

günlerini seçerek bir boyutlu açık (explicit) sonlu farklar yöntemi ile üç günlük sayısal çözümleme yapmışlardır. Çalışmada, faz değiştiren malzemelerin erime sıcaklıkları 28°C ve 43°C olarak seçilmiştir. 20 mm kalınlığında erime sıcaklığı 28°C olan faz değiştiren malzemenin iç duvar yüzey sıcaklığına ve termal konfor gereksinimlerine katkı sağladığını belirtmişlerdir.

Diaconu ve Cruceru [42] farklı faz değiştiren malzemelerin ısıtma ve soğutma yüklerine etkisini tespit etmek amacıyla yaptıkları çalışmada duvar içerisine yaz mevsimi için dış yüzeye yakın ve kış mevsimi için iç yüzeye yakın faz değiştiren malzeme yerleştirmişlerdir. Çalışmada, Cezayir'e ait iklim verileri TRNSYS Type 109-TMY2 kullanılarak bir yıllık simülasyon yapılmıştır. Önerilen duvar sisteminin yıllık enerji tasarrufuna katkıda bulunduğu, ısıtma ve soğutma yüklerini azalttığı beyan etmişlerdir.

Mi ve arkadaşlarının [51] faz değiştiren malzemelerin binalarda enerji tasarrufuna etkisini tespit etmek amacıyla yaptıkları çalışmada DesignBuilder ile ofis binası modellenmiştir ve bina duvarına 27°C erime sıcaklığı olan faz değiştiren malzeme entegre edilmiştir. Çalışmada, Çin'in iklim koşullarında şiddetli soğukların yaşandığı Shenyang, soğukların yaşandığı Zhengzhou, sıcak yaz ve soğuk kış yaşanan Changsha, sıcak yaz ve ılıman kış yaşanan Hong Kong ve ılıman bölge olan Kunming şehirleri seçilmiştir. Haziran ayının tipik bir gününde bir boyutlu açık (explicit) sonlu farklar yöntemi kullanarak EnergyPlus ile çözümlenmişlerdir. Şiddetli soğukların yaşandığı Shenyang için enerji tasarrufu potansiyelinin en iyi olduğu belirtilmiştir. Faz değiştiren malzeme yatırımının Shenyang, Zhengzhou ve Changsha şehirleri için uygun olduğu Hong Kong ve Kunming şehirleri için yatırımın fayda sağlamadığı sonucuna varmışlardır.

Faraji [57] faz değiştiren malzemelerin binalarda enerji tasarrufuna etkisini tespit etmek amacıyla yaptığı çalışmada erime sıcaklığı 16°C olan faz değiştiren malzemeyi duvar içerisinde iki ayrı konuma yerleştirmiştir. Fas'a ait saatlik iklim verilerini kullanarak Ocak ayı için yılın tipik soğuk günleri seçilerek bir boyutlu açık (explicit) sonlu farklar yöntemi ile çözümlenmiştir. Faz değiştiren malzemenin erimesiyle birlikte iç duvar sıcaklığında önemli miktarda azalma olduğunu gözlemlemiştir. Termal konfor sıcaklığına yakın bir erime sıcaklığı seçilmesinin

düşük tepe sıcaklıklarının oluşmasını sağladığı ve sıcaklık dalgalanmalarını %25 oranında azalttığı, bu durumun enerji tasarrufu üzerinde önemli bir katkı sağladığı sonucuna varmıştır.

Zwanzig ve arkadaşlarının [58] faz değiştiren malzemelerin binalarda kullanılması ile optimum enerji tasarrufunu belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada faz değiştiren malzemeyi bina duvarı içerisinde dış yüzeye yakın, ortada ve iç yüzeye yakın olmak üzere farklı konumlarda yerleştirmişlerdir. Çalışmada, Minneapolis, Louisville ve Miami şehirlerinde kış mevsimi için 23-27 Şubat, yaz mevsimi için 15-19 Temmuz günlerinde iklim verileri ölçülmüştür ve bir boyutlu açık (explicit) sonlu farklar yöntemi ile çözümlenmiştir. Faz değiştiren malzemenin yaz ve kış mevsiminde enerji tasarrufu sağladığı ve özellikle yaz mevsiminde en yüksek verimin olduğu sonucuna varmışlardır.

Zhou ve arkadaşlarının [59] bir boyutlu açık (explicit) sonlu farklar yöntemi kullanarak yaptıkları çalışmada, faz değiştiren malzemenin erime sıcaklığı 20°C ile 25°C arasında 1°C'lik aralıklarla seçilmiştir. Faz değiştiren malzemelerin erime sıcaklığının seçimi iç ortam sıcaklık dalgalanmaları için önemli bir faktör olduğunu belirtmişlerdir. Uygun maliyet için en az 50 kJ/kg erime ısısına sahip malzeme kullanmak gerektiğini önermişlerdir.

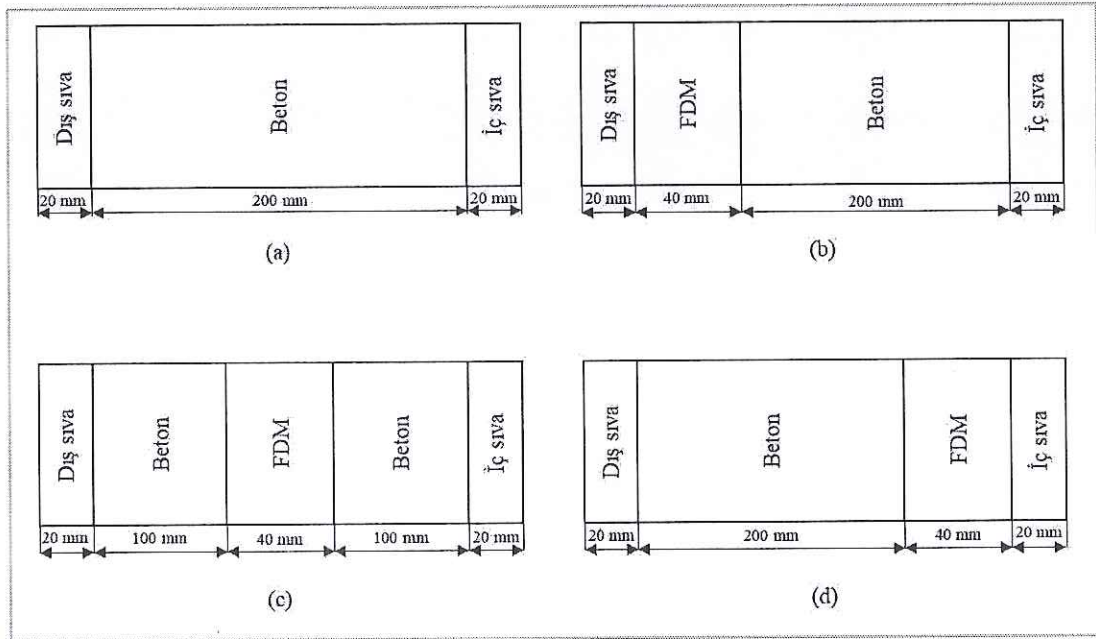
Izquierdo-Barrientos ve arkadaşlarının [60] yaptıkları çalışmada bir boyutlu açık (explicit) sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada, faz değiştiren malzeme; mevsime, duvarın yönüne, erime sıcaklığına göre seçilmiştir. 6 gün kış mevsiminden, 6 gün yaz mevsiminden olmak üzere Ocak ve Temmuz aylarında ölçülen iklim verilerini kullanmışlardır. Mevsime, duvar yönüne ve faz değiştiren malzemenin duvar içerisindeki konumuna bağlı olarak erime sıcaklığının 5°C ile 35°C arasında olması gerektiğini önermişlerdir. Uygun erime sıcaklığına sahip faz değiştiren malzeme seçildiğinde anlık ısı akışının maksimum değerini azami miktarda azaltmaya yardımcı olacağı sonucuna varmışlardır.

2. PROBLEMİN TANITILMASI VE SAYISAL YÖNTEM

Bu bölümde, öncelikle çalışmanın geometrisi, kullanılan malzemeler, uygulanan iklim koşulları hakkında bilgi verildi, daha sonra sayısal yöntem ve yöntemin uygulanması açıklandı.

2.1. Problemin Tanıtılması

Bu çalışmada, faz değiştiren malzemenin duvar içerisindeki konumunun etkisini incelemek amacıyla iç ve dış tabakada 20 mm kalınlığında sıva ve 200 mm kalınlığında betondan oluşan duvara, 40 mm kalınlığında faz değiştiren malzeme dış sıva ile beton arasına, betonun ortasına ve iç sıva ile beton arasına eklenerek modellendi ve Şekil 2.1’de gösterildi.



Şekil 2.1. Problemin şematik gösterimi, a) FDM'siz duvar, b) FDM dış sıva ile beton arasında, c) FDM betonun ortasında, d) FDM iç sıva ile beton arasında

Çalışmada kullanılan malzemelerin termofiziksel özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak değişmediği varsayıldı. Bina yapı malzemelerinin ve 12 farklı faz değiştiren malzemenin termofiziksel özellikleri Tablo 2.1’de verildi.

Tablo 2.1. Malzemelerin termofiziksel özellikleri [44,54]

Malzeme	k (W/mK)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kgK)	T_m (°C)	L_H (kJ/kg)
Sıva	0,72	1860	840	-	-
Beton	1,40	2300	880	-	-
RT-9HC	0,2 (katı-sıvı)	880 (katı) 770 (sıvı)	2000 (katı-sıvı)	-9	250
RT0				0	175
RT5HC				5	250
RT8HC				8	190
RT10HC				10	200
RT12				12	155
RT15				15	260
RT18HC				18	190
RT21HC				21	230
RT25HC				25	250
RT28HC				28	240
RT35HC				35	250

Faz değiştiren malzemelerinin uygulanabilir olması iklim koşullarına bağlıdır [5]. Bu nedenle öncelikle uygulanacak iklim koşulları belirlendi. Bulut ve arkadaşlarının [45] iklim koşullarını fonksiyonlarla ifade edebilmek amacıyla yaptıkları çalışmada Türkiye'deki şehirlere ait günlük maksimum ve minimum sıcaklığı veren fonksiyon parametreleri 15 yıllık ölçülen veriler yardımıyla belirlemişlerdir. Türkiye'deki 67 şehir için elde ettikleri fonksiyon parametreleri EK-A'da verildi. Çalışmada verilen fonksiyon parametreleri ile gün içerisinde meydana gelen maksimum ve minimum sıcaklıklar sırasıyla Denklem (2.1) ve Denklem (2.2)'deki gibi;

$$T_{\max} = T_1 - (T_1 - T_2) \cos \left[\frac{2\pi}{365} (n-25) \right] \quad (2.1)$$

$$T_{\min} = T_3 - (T_3 - T_4) \cos \left[\frac{2\pi}{365} (n-25) \right] \quad (2.2)$$

hesaplandı. Burada $T_{\max}$ ve $T_{\min}$ sırasıyla gün içerisinde meydana gelen maksimum ve minimum sıcaklığı, T_1 , T_2 , T_3 ve T_4 fonksiyon parametrelerini göstermektedir, n ise 1 Ocaktan itibaren yılın günlerini göstermektedir. Bu çalışmada, ısıtma durumu için $n=21$ (21 Ocak), soğutma durumu için $n=203$ (21 Temmuz) alındı. Isıtma ve soğutma durumuna göre Denklem (2.1) ve Denklem (2.2) kullanılarak hesaplanan maksimum ve minimum sıcaklıklar EK-B'de verildi. Bulut ve arkadaşları [45] dış hava sıcaklığının gün boyunca değişimini iki ayrı bölgeye ayırmışlar ve bölgeler için

eşitlikler önermişlerdir. İki ayrı bölge için dış hava sıcaklığının gün boyunca değişimi Denklem (2.3) ve Denklem (2.4)'deki gibi;

$$T_d(t) = T_{\min} + (T_{\max} - T_{\min}) \sin \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{t - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}} \right) \right]^{1,4} \quad (2.3)$$

$$T_d(t) = T_{\max} - (T_{\max} - T_{\min}) \sin \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{t - t_{\max}}{24 + t_{\min} - t_{\max}} \right) \right]^{1,2} \quad (2.4)$$

hesaplandı. Burada $T_d(t)$ gün boyunca değişen dış hava sıcaklığını göstermektedir. Denklem (2.3) 1. bölgenin sıcaklık değişimini vermektedir ve bu bölge minimum sıcaklığın olduğu saatten başlayarak maksimum sıcaklığın olduğu saate kadar olan süreyi kapsamaktadır. Denklem (2.4) ise 2. bölgenin sıcaklık değişimini vermektedir ve gün içerisinde kalan süreyi kapsamaktadır. Denklem (2.3) ve Denklem (2.4)'de $t_{\min}$ ve $t_{\max}$ sırasıyla minimum ve maksimum sıcaklığının olduğu zamanları göstermektedir ve Denklem (2.5) ve Denklem (2.6)'daki gibi;

$$t_{\min} = 12 - (t_d / 2) \quad (2.5)$$

$$t_{\max} = 12 + (t_{\min} (12 - t_{\min})) / 13,5 \quad (2.6)$$

hesaplandı [45]. Burada t_d gün uzunluğunu ifade etmektedir ve Denklem (2.7)'deki gibi;

$$t_d = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan(\phi)\tan(\delta)) \quad (2.7)$$

hesaplandı. Burada ϕ enlem açısını ifade etmektedir. δ ise güneşin doğrultusu ile ekvator düzlemi arasındaki açı olan deklinasyon açısını göstermektedir ve Denklem (2.8)'deki gibi;

$$\delta = 23,45 \sin \left(\frac{2\pi}{365} (n + 284) \right) \quad (2.8)$$

hesaplandı. Bu çalışmada, TS 825 standartlarınca belirlenmiş derece gün bölgeleri haritasına [52] göre Türkiye'de farklı iklim bölgelerinde bulunan 67 şehir için

yapılan hesaplamalar sonucunda, 21 Ocak tarihinde maksimum ve minimum dış hava sıcaklığının sırasıyla Adana ve Ağrı'da olduğu, 21 Temmuz tarihinde ise Batman ve Artvin'de olduğu belirlendi. Seçilen bu şehirler iklim bölgelerine göre sıralandığında; Adana 1. iklim bölgesinde, Batman 2. iklim bölgesinde, Artvin 3. iklim bölgesinde ve Ağrı 4. iklim bölgesinde bulunmaktadır. Çalışmada, saatlik güneş ışınlamını belirlemek için ASHRAE bulutsuz gökyüzü teorik modeli kullanıldı ve Denklem (2.9)'daki gibi;

$$I(t)=Ae^{(-B/\cos(\phi_z))}\cos(\phi_z)+C\left(Ae^{(-B/\cos(\phi_z))}\cos(\phi_z)\right) \quad (2.9)$$

hesaplandı [46]. Burada A, B ve C sabitleri sırasıyla belirgin güneş radyasyonu sabiti, atmosferik sönmeme katsayısı ve gökyüzü yayılım faktörünü göstermektedir. Bu çalışmada, 21 Ocak ve 21 Temmuz günleri için A, B ve C sabitleri Tablo 2.2'de verildi.

Tablo 2.2. ASHRAE sabitleri [46]

Tarih	A (W/m ²)	B	C
21 Ocak	1229,475	0,142	0,058
21 Temmuz	1084,460	0,207	0,136

Denklem (2.9)'da verilen $\cos(\phi_z)$ güneşin doğrultusu ile dikey eksen arasındaki açı olan zenit açısını ifade etmektedir ve Denklem (2.10)'daki gibi;

$$\cos(\phi_z)=\cos(\delta)\cos(\phi)\cos(w)+\sin(\delta)\sin(\phi) \quad (2.10)$$

hesaplanmaktadır [46]. Burada w saat açısını göstermektedir ve Denklem (2.11)'deki gibi;

$$w=15(12-t_s) \quad (2.11)$$

hesaplandı. Burada t_s güneş saatini göstermektedir ve Denklem (2.12)'deki gibi;

$$t_s=t_y+t_e/60-4/60(\lambda_s-\lambda_1) \quad (2.12)$$

hesaplandı [46]. Burada, t_y yerel saati göstermektedir. λ_s ve λ_1 sırasıyla standart ve yerel boylamlardır. Türkiye için standart boylam 45° doğu boylamıdır. Bu çalışma için seçilen illerin enlem ve boylamları Tablo 2.3'de verildi.

Tablo 2.3. Enlem ve boylamlar [47]

	Adana	Batman	Artvin	Ağrı
Enlem (ϕ)	36°59'	37°52'	41°10'	39°31'
Boylam (λ_l)	35°18'	41°10'	41°49'	43°08'

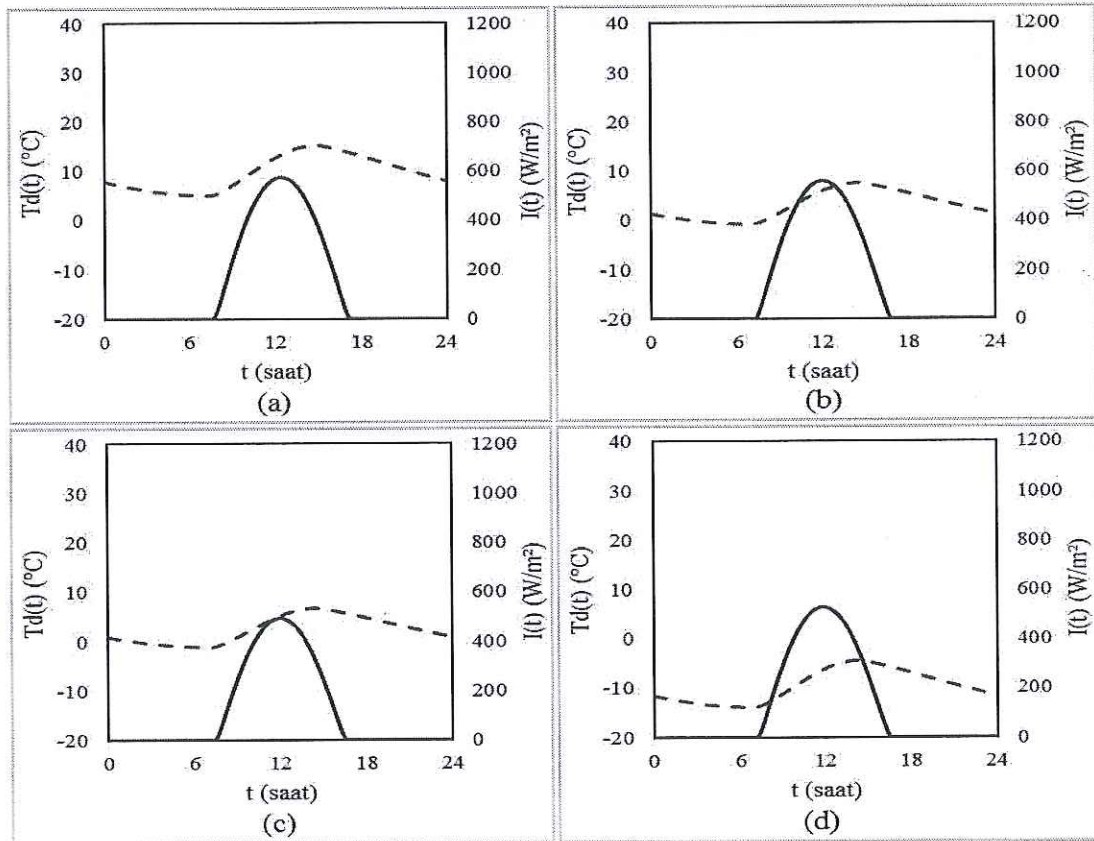
Denklem (2.12)'deki t_e zaman eşitliğini ifade etmektedir ve Denklem (2.13)'deki gibi;

$$t_e = 9,87 \sin\left(\frac{4\pi(n-81)}{365}\right) - 7,53 \cos\left(\frac{2\pi(n-81)}{365}\right) - 1,5 \sin\left(\frac{2\pi(n-81)}{365}\right) \quad (2.13)$$

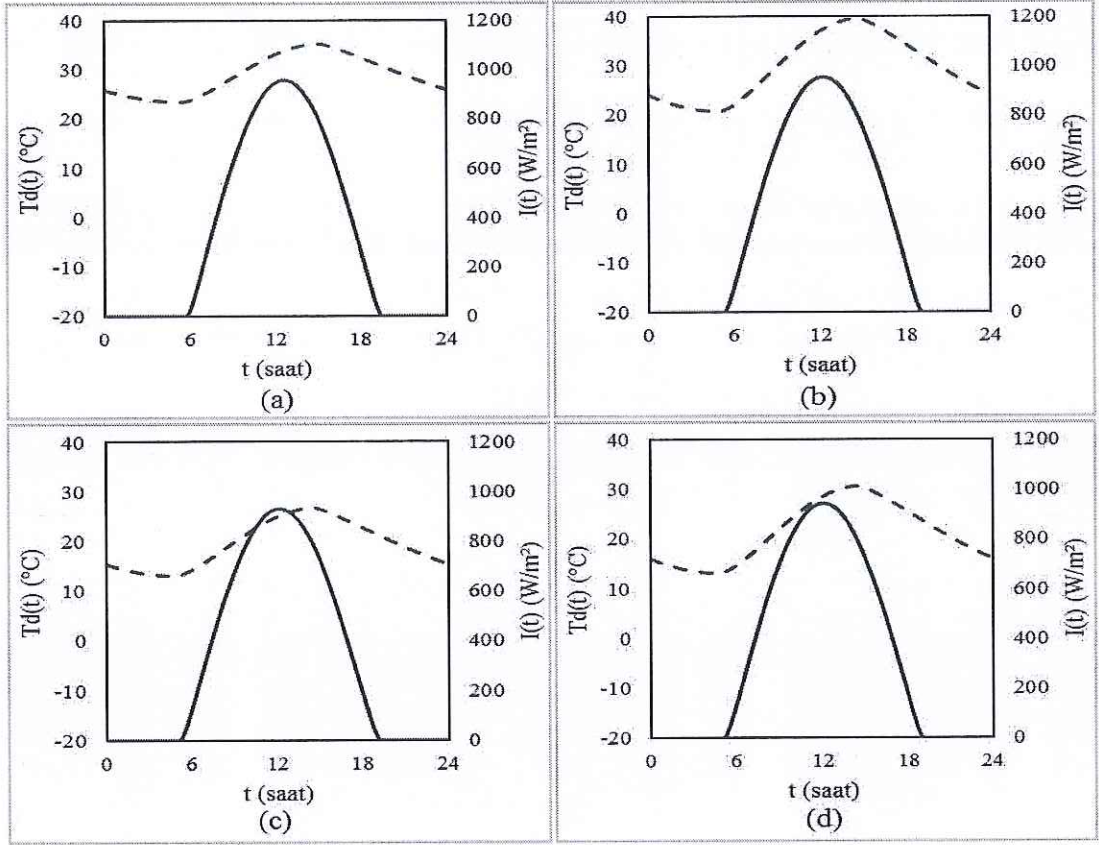
hesaplandı [46]. Bu çalışmada gökyüzü sıcaklığının değişimi, Swinbank'ın [50] gökyüzü sıcaklığını verilen dış hava sıcaklığının bir fonksiyonu olarak önerdiği Denklem (2.14),

$$T_{sky}(t) = 0,0552 T_d(t)^{1,5} \quad (2.14)$$

yardımıyla belirlendi. İklim koşulları, 21 Ocak ve 21 Temmuz günlerine ait dış hava sıcaklığı ve güneş ışınlamı değişimleri sırasıyla Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'de gösterildi.



Şekil 2.2. Isıtma iklim koşulları, a) Adana, b) Batman, c) Artvin, d) Ağrı



Şekil 2.3. Soğutma iklim koşulları, a) Adana, b) Batman, c) Artvin, d) Ağrı

2.2. Sayısal Yöntem

Bu çalışmada, duvar boyunca ısı transferinin tek boyutlu olduğu kabul edildi. Duvarda bina yapı malzemelerinde ve faz değiştiren malzeme tabakasında faz değişimi gerçekleşmediği durumda, bir başka deyişle malzemenin tümünün katı ya da sıvı fazda olduğu durumda iletimle olan ısı geçişi Denklem (2.15)'teki gibidir;

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.15)$$

Burada $\alpha (=k/\rho C_p)$ malzemelerin ısı yayılım katsayısını göstermektedir. Faz değişimi sırasında, bir başka deyişle erime/katılaşmanın gerçekleştiği esnada ısı geçişi Denklem (2.16)'daki gibidir;

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{L_H}{C_p} \frac{\partial f}{\partial t} \quad (2.16)$$

Burada L_H faz değıştiren malzemenin erime ısısını, f ise faz değışiminin gerekleştėđi esnada malzeme içerisindeki sıvı oranını göstermektedir ve Denklem (2.17)'de verildi;

$$f(t)=\begin{cases} T>T_m & \text{ise } 1 \\ T=T_m & \text{ise } f(t) \\ T<T_m & \text{ise } 0 \end{cases} \quad (2.17)$$

Burada T_m faz değıştiren malzemenin erime sıcaklığını göstermektedir. Çalışmada, duvarın dış ve i yzeyinlerindeki sınır şartları sırasıyla Denklem (2.18) ve Denklem (2.19)'da verildi;

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_o = h_o [T_d(t) - T_o(t)] + \alpha_G I(t) + \varepsilon \sigma [T_{sky}(t)^4 - T_o(t)^4] \quad (2.18)$$

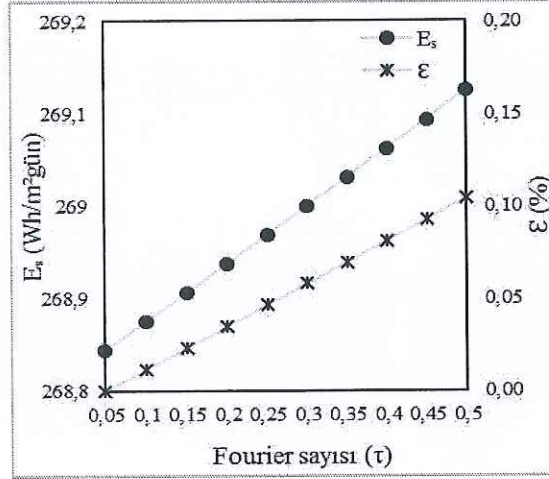
$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_i = h_i [T_i(t) - T_{oda}] \quad (2.19)$$

Burada, $T_o(t)$ ve $T_i(t)$ sırasıyla duvar dış yüzey ve i yüzey sıcaklığını, $T_d(t)$ gün boyunca değışen dış hava sıcaklığını, T_{oda} oda sıcaklığını göstermektedir. Isıtma ve soğutma durumu için oda sıcaklığı 18°C olarak alındı. h_o ve h_i sırasıyla dış ortam ve iç ortam ile duvar yüzeyi arasındaki ısı taşınım katsayısını göstermektedir ve bu değerler sırasıyla 22 ve 9 $\text{W/m}^2\text{K}$ olarak alındı [49]. α_G güneş ışınımını yutma oranını (0,6), ε ışınım neşretme katsayısını (0,4), σ Stefan-Boltzmann sabitini ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$) göstermektedir [54].

Bu çalışmada, tek boyutlu zamana bağlı ısı transferinin sayısal olarak çözümlenmesinde açık sonlu farklar yöntemi kullanıldı. Sonuçların kararlı olması ve gerçek çözüme yaklaşması için ısı iletiminin ısı enerji depolama hızına oranı olarak tanımlanan fourier sayısı (τ) belirlenmiş bir st limitin altında tutulmalıdır. Buna göre, kararlılık lt Denklem (2.20)'deki gibidir;

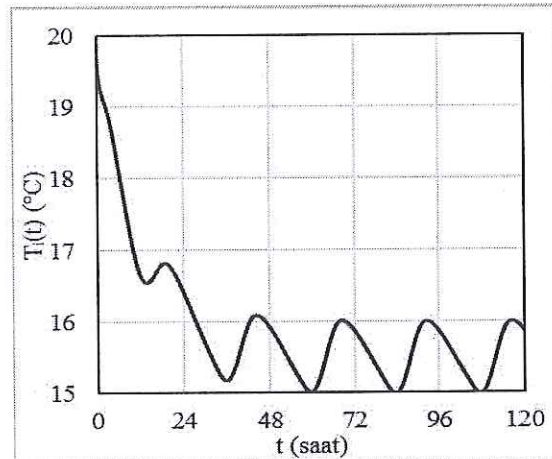
$$\tau = \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{2} \quad (2.20)$$

Denklem (2.15) ve Denklem (2.16)'da görüldüğü gibi, zamana bağlı ısı iletim denkleminde sıcaklık hem konuma hem de zamana göre değişmektedir. Bu nedenle konuma ve zamana göre ayırıklaştırma gerekmektedir. Konuma göre ayırıklaştırma için ikinci mertebeden merkezi farklar metodu, zamana göre ayırıklaştırma için birinci mertebeden ileri farklar metodu kullanıldı. Farklı fourier sayıları ile çözümler yapıldı ve Şekil 2.4'de gösterildi.



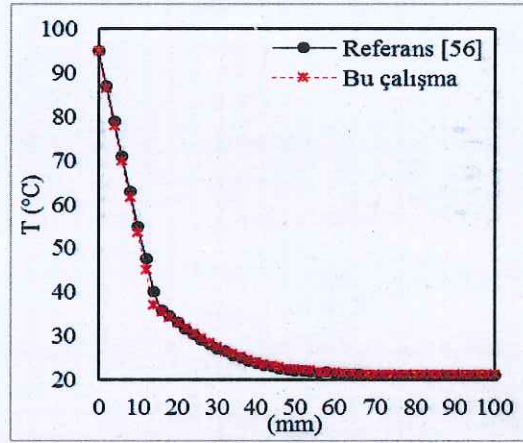
Şekil 2.4. Yaklaşım hatası analizi

Buna göre, konum adımı (Δx) 0,01 m, zaman adımı (Δt) yaklaşık 70 s olarak alındı. Başlangıç koşulu olarak, tüm duvarın 20°C olduğu kabul edildi. Çözümün 24 saatlik zaman dilimleri içerisinde periyodik olarak değişimini sağlamak için yapılan çözümler sonrası üçüncü günden itibaren sonucun periyodik olarak tekrarlandığı Şekil 2.5'de gösterildi. Bu nedenle çalışmada üç günlük çözümün son 24 saatlik sonuçları incelendi.



Şekil 2.5. Kararlılık analizi

Analizler için bir Fortran kodu geliştirildi. Geliştirilen kod, yarı sonsuz bir faz değiştiren malzemeden oluşan levhanın erimesinin hem analitik hem de sayısal olarak incelendiği Solomon'un [56] sonuçları ile doğrulandı. Isı yayılım katsayısı $8,12 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, erime sıcaklığı $36,7^\circ\text{C}$, erime ısısı 247 kJ/kg olan 100 mm kalınlığında $\text{C}_{20}\text{H}_{42}$ faz değiştiren malzeme kullanıldı. Levhanın başlangıç sıcaklığı 21°C olarak alındı ve levhanın bir yüzeyi 95°C sıcaklıkta sabit tutuldu. Solomon'un [56] çalışmasında olduğu gibi konum adımı $\Delta x=0,002 \text{ m}$, zaman adımı yaklaşık $\Delta t=9 \text{ s}$ olarak alındı. Bu çalışmada geliştirilen kod ile elde edilen sonuçlar Solomon'un [56] çalışmasındaki analitik sonuçlar ile karşılaştırıldı ve Şekil 2.6'da gösterildi. Şekilde görüldüğü gibi, çok iyi bir uyum olduğu sonucuna ulaşıldı.



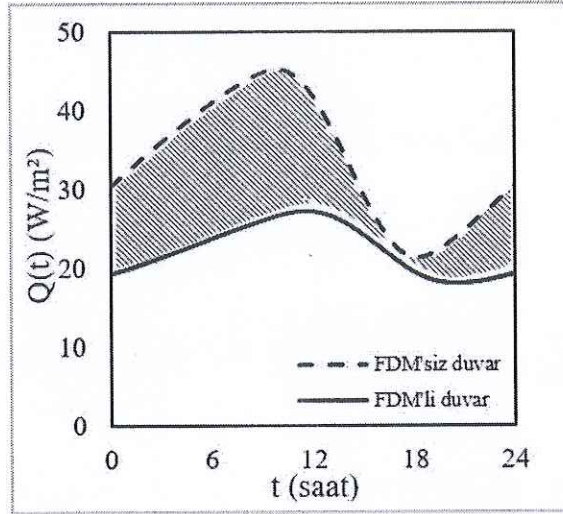
Şekil 2.6. Sayısal modelin doğrulanması

Bu çalışmada, duvardan geçen ısı miktarları (Q), iklim koşullarına ve malzemelerin duvar içerisindeki konumlarına göre her malzeme için belirlendi ve günlük toplam enerji miktarı (E) hem faz değiştiren malzeme içeren duvar (E_{FDM}) hem de faz değiştiren malzeme içermeyen duvar ($E_{\text{FDM'siz}}$) için ayrı ayrı Denklem (2.21)'deki gibi;

$$E = \int_0^{24} Q(t)dt = \int_0^{24} h_i [T_i(t) - T_{\text{oda}}] dt \quad (2.21)$$

hesaplandı. Enerji tasarrufu (E_s), Şekil 2.7'de taralı alan olarak gösterildi ve faz değiştiren malzeme içermeyen duvardan geçen günlük toplam enerji miktarı ($E_{\text{FDM'siz}}$) ile faz değiştiren malzeme içeren duvardan geçen günlük toplam enerji miktarı (E_{FDM}) arasındaki fark olarak Denklem (2.22)'deki gibi hesaplandı;

$$E_s = E_{\text{FDM'siz}} - E_{\text{FDM}} \quad (2.22)$$



Şekil 2.7. Enerji tasarrufu şematik gösterimi

Bu çalışmada, enerji tasarrufunun yanı sıra duvar yapı malzemelerinin ısı depolama kapasitesinin yani ısıl kütlesinin fonksiyonları olan genlik küçültme faktörü ve zaman gecikmesi parametreleri de incelendi. Genlik küçültme faktörü, duvar iç yüzeyindeki sıcaklık değişimi genliğinin, duvar dış yüzeyindeki sıcaklık değişimi genliğine oranı olarak tanımlanır ve Denklem (2.23)'deki gibi;

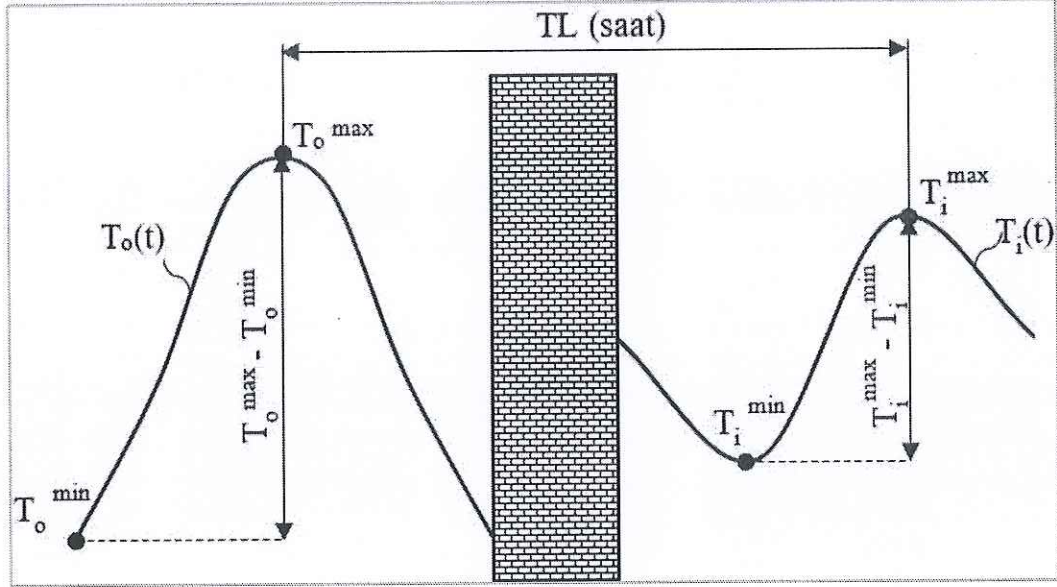
$$DF = \frac{T_i^{\max} - T_i^{\min}}{T_o^{\max} - T_o^{\min}} \quad (2.23)$$

hesaplanır [53]. Burada, $T_i^{\max}$ ve $T_i^{\min}$ sırasıyla duvarın iç yüzeyindeki maksimum ve minimum sıcaklığı gösterirken, $T_o^{\max}$ ve $T_o^{\min}$ ise sırasıyla duvarın dış yüzeyindeki maksimum ve minimum sıcaklığı göstermektedir. Zaman gecikmesi ise duvarın dış yüzeyinde maksimum sıcaklığın meydana geldiği saat ile iç yüzeyinde maksimum sıcaklığın meydana geldiği saat arasındaki zaman farkı olarak tanımlanır ve Denklem (2.24)'deki gibi;

$$TL = \begin{cases} t_{T_i^{\max}} > t_{T_o^{\max}} & \text{ise } t_{T_i^{\max}} - t_{T_o^{\max}} \\ t_{T_i^{\max}} = t_{T_o^{\max}} & \text{ise } 24 \\ t_{T_i^{\max}} < t_{T_o^{\max}} & \text{ise } t_{T_i^{\max}} - t_{T_o^{\max}} + 24 \end{cases} \quad (2.24)$$

hesaplanır [53].

Burada, $t_{T_1}^{\max}$ duvarın iç yüzeyinde maksimum sıcaklığın meydana geldiği saati, $t_{T_0}^{\max}$ ise duvarın dış yüzeyinde maksimum sıcaklığın meydana geldiği saati göstermektedir. Genlik küçültme faktörü ve zaman gecikmesi şematik olarak Şekil 2.8’de gösterildi.



Şekil 2.8. Genlik küçültme faktörü ve zaman gecikmesi şematik gösterimi

Duvarın genlik küçültme faktörü küçük olursa, iç ortam sıcaklığı konfor sıcaklığına yakın olur. Örneğin, gün içerisinde dış yüzey sıcaklığında 20°C 'lik değişim yaşayan ve genlik küçültme faktörü 0,2 olan bir duvar, iç yüzey sıcaklığında 4°C 'lik bir değişim yaşarken, genlik küçültme faktörü 0,05 olan bir duvarın iç yüzey sıcaklığında 1°C 'lik bir değişim yaşar. Benzer şekilde, genlik küçültme faktörü küçük olursa, zaman gecikmesi de artar. Örneğin, ısıtma koşulunda gün içerisinde dış ortam sıcaklığının minimum olduğu saatin ve soğutma koşulunda gün içerisinde dış ortam sıcaklığının maksimum olduğu saatin, iç ortam sıcaklığına etkisi gecikir. Buna bağlı olarak, gün içerisinde ısıtma ve soğutma yükleri azalır ve enerji tasarrufu miktarı artar.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, 12 farklı faz değiştiren malzemenin termofiziksel özelliklerinin ve malzemenin bina duvarı içerisindeki konumunun enerji tasarrufu, genlik küçültme faktörü ve zaman gecikmesi üzerindeki etkisi bir boyutlu açık sonlu farklar yöntemi kullanılarak sayısal olarak incelendi.

İklim koşulu olarak, ısıtma durumunda 21 Ocak, soğutma durumunda 21 Temmuz günleri seçildi ve Türkiye'nin farklı iklim bölgesinden seçilen şehirlere ait dış hava sıcaklığı ve güneş ışınımının günlük değişimi kullanıldı. Tüm bu değişkenler göz önüne alındığında 288 farklı durum için analizler yapıldı.

Faz değiştiren malzeme tabakasında faz değişiminin gerçekleşip gerçekleşmediği, faz değiştiren malzemenin konumunun dış sıva ile beton arasında, betonun ortasında ve iç sıva ile beton arasında olması durumu için sırasıyla Tablo 3.1, Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'de gösterildi. Çizelgelerde iklim koşullarına bağlı olarak, faz değiştiren malzeme tabakasında faz değişiminin gerçekleşmediği bir başka deyişle, 24 saatlik periyotta sadece katı veya sadece sıvı olduğu durumlar sırasıyla 0 ve 1 olarak, faz değişimi gerçekleştiği durumlar ise taralı alan olarak gösterildi.

Tablo 3.1. FDM dış sıva ile beton arasında ise faz değişimi durum çizelgesi

		RT-9HC	RT0	RT5HC	RT8HC	RT10HC	RT12	RT15	RT18HC	RT21HC	RT25HC	RT28HC	RT35HC
Isıtma (21 Ocak)	Adana	1	1	1							0	0	0
	Batman	1	1						0	0	0	0	0
	Artvin	1	1						0	0	0	0	0
	Ağrı				0	0	0	0	0	0	0	0	0
Soğutma (21 Temmuz)	Adana	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
	Batman	1	1	1	1	1	1	1	1				
	Artvin	1	1	1	1	1	1						
	Ağrı	1	1	1	1	1	1						

Tablo 3.2. FDM betonun ortasında ise faz değişimi durum çizelgesi

		RT-9HC	RT0	RT5HC	RT8HC	RT10HC	RT12	RT15	RT18HC	RT21HC	RT25HC	RT28HC	RT35HC
Isıtma (21 Ocak)	Adana	1	1	1	1					0	0	0	0
	Batman	1	1					0	0	0	0	0	0
	Artvin	1	1					0	0	0	0	0	0
	Ağrı	1				0	0	0	0	0	0	0	0
Soğutma (21 Temmuz)	Adana	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
	Batman	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
	Artvin	1	1	1	1	1	1	1					0
	Ağrı	1	1	1	1	1	1	1					

Tablo 3.3. FDM iç sıva ile beton arasında ise faz değişimi durum çizelgesi

		RT-9HC	RT0	RT5HC	RT8HC	RT10HC	RT12	RT15	RT18HC	RT21HC	RT25HC	RT28HC	RT35HC
Isıtma (21 Ocak)	Adana	1	1	1	1	1	1		0	0	0	0	0
	Batman	1	1	1	1				0	0	0	0	0
	Artvin	1	1	1	1				0	0	0	0	0
	Ağrı	1	1					0	0	0	0	0	0
Soğutma (21 Temmuz)	Adana	1	1	1	1	1	1	1	1				0
	Batman	1	1	1	1	1	1	1	1				0
	Artvin	1	1	1	1	1	1	1	1			0	0
	Ağrı	1	1	1	1	1	1	1					0

Çizelgelerde bulunan taralı bölgeler incelendiğinde, aynı iklim koşulunda birden fazla faz değiştiren malzemede erime ve katılaşmanın gerçekleştiği belirlendi. Örneğin; ısıtma durumunda Adana için malzeme dış sıva ile beton arasında ise erime sıcaklığı 8°C ile 21°C arasında olan malzemelerde faz değişiminin gerçekleştiği görüldü.

Ayrıca, aynı iklim koşulu için malzemelerin duvar içindeki konumuna göre farklı faz değiştiren malzemelerde faz değişiminin gerçekleştiği belirlendi. Örneğin; ısıtma durumunda Ağrı için malzeme dış sıva ile beton arasında ise erime sıcaklığı -9°C ile 5°C arasında olan malzemelerde, betonun ortasında ise erime sıcaklığı 0°C ile 8°C

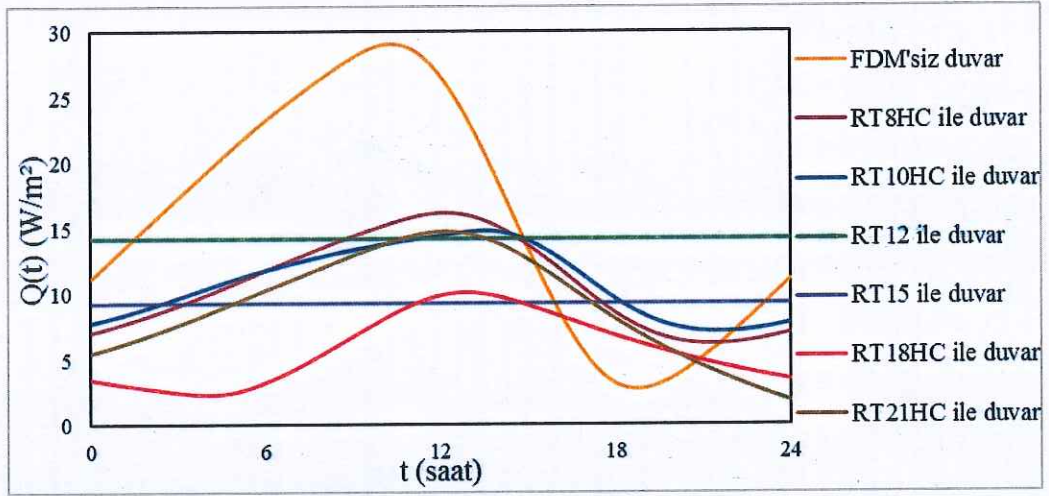
arasında olan malzemelerde ve iç sıva ile beton arasında ise erime sıcaklığı 5°C ile 12°C olan malzemelerde erime ve katılaşmanın gerçekleştiği görüldü.

Isıtma durumunda diğer şehirlere kıyasla, Ağrı'da erime sıcaklıkları sırasıyla -9°C ve 0°C olan RT-9HC ve RT0 faz değiştiren malzemelerde, Adana'da ise erime sıcaklıkları 18°C ve 21°C olan RT18HC ve RT21HC faz değiştiren malzemelerde erime ve katılaşmanın gerçekleştiği belirlendi. Ayrıca, ısıtma durumunda Batman ve Artvin için malzeme dış sıva ile beton arasında ise erime sıcaklığı 5°C ile 15°C arasında olan malzemelerde, betonun ortasında ise erime sıcaklığı 5°C ile 12°C arasında olan malzemelerde ve iç sıva ile beton arasında ise erime sıcaklığı 10°C ile 15°C olan malzemelerde erime ve katılaşmanın gerçekleştiği görüldü.

Soğutma durumunda ise Adana ve Batman'a kıyasla Artvin ve Ağrı'da, erime sıcaklıkları 15°C ve 18°C olan RT15 ve RT18HC malzemelerde faz değişiminin gerçekleştiği görüldü. Ayrıca, şehirlerin hepsi için erime sıcaklıkları sırasıyla 25°C, 28°C ve 35°C olan RT25HC, RT28HC ve RT35HC faz değiştiren malzemelerin duvarda dış sıva ile beton arasına yerleştirilmesi ile faz değişimi gerçekleştiği belirlendi. Artvin hariç diğer şehirler için erime sıcaklığı 35°C olan RT35HC malzemesinin betonun ortasına yerleştirilmesi ile faz değişimi gerçekleştiği, iç sıva ile beton arasına yerleştirilmesi ile seçilen şehirlerin hepsi için faz değişimi gerçekleşmediği belirlendi. Ayrıca, Artvin hariç diğer şehirler için erime sıcaklığı 28°C olan RT28HC malzemesinin iç sıva ile beton arasına yerleştirilmesi ile faz değişiminin gerçekleştiği belirlendi.

Malzemenin duvar içerisindeki konumundan bağımsız olarak, ısıtma durumunda seçilen şehirlerin hepsinde faz değiştirebilen ortak bir malzemenin olmadığı, soğutma durumunda ise seçilen şehirlerin hepsi için erime sıcaklığı 25°C olan RT25HC malzemesinin faz değiştirdiği belirlendi.

Faz değişimi durum çizelgelerinde taralı alan olarak gösterilen bir başka deyişle, faz değişimi gerçekleşen malzemelerden optimum malzemeyi belirlemek amacıyla, enerji tasarrufu miktarları malzemelerin duvar içerisindeki konumuna bağlı olarak belirlendi. Örneğin; ısıtma koşulunda Adana için erime ve katılaşmanın görüldüğü malzemelerin duvarda dış sıva ile beton arasına yerleştirilmesi durumunda 24 saatlik periyotta duvardan geçen ısı miktarı grafiği Şekil 3.1'de verildi.

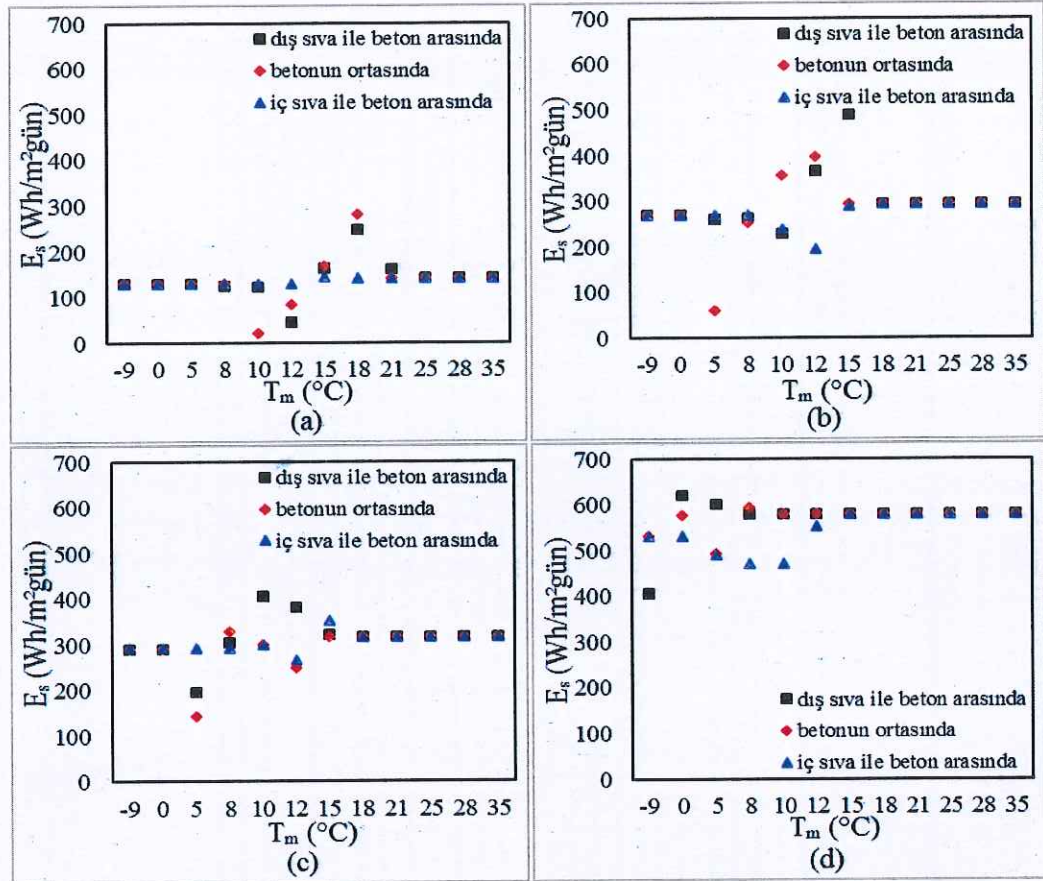


Şekil 3.1. Isıtma iklim koşulunda Adana için duvardan geçen ısı miktarı

Şekil 3.1'de görüldüğü gibi, 'FDM'siz duvar' eğrisinin altında kalan alan faz değiştiren malzeme içermeyen duvar için günlük toplam enerji miktarını ($E_{FDM'siz}$), diğer eğrilerin altında kalan alanlar ise faz değiştiren malzemeleri içeren duvarlar için günlük toplam enerji miktarlarını (E_{FDM}) vermektedir. Buna göre, ısıtma koşulunda Adana için erime sıcaklığı 18°C olan RT18HC malzemesinin dış sıva ile beton arasında olması durumunda, Şekil 3.1'de gösterilen diğer faz değiştiren malzemelere kıyasla maksimum enerji tasarrufu sağladığı ve enerji tasarrufunun $246,1 \text{ Wh/m}^2\text{gün}$ olduğu belirlendi. Burada, ısıtma koşulunda Adana için erime sıcaklığı 12°C olan RT12 malzemesinin duvarda dış sıva ile beton arasında olması durumunda minimum enerji tasarrufu sağladığı ve enerji tasarrufunun $44,01 \text{ Wh/m}^2\text{gün}$ olduğu belirlendi.

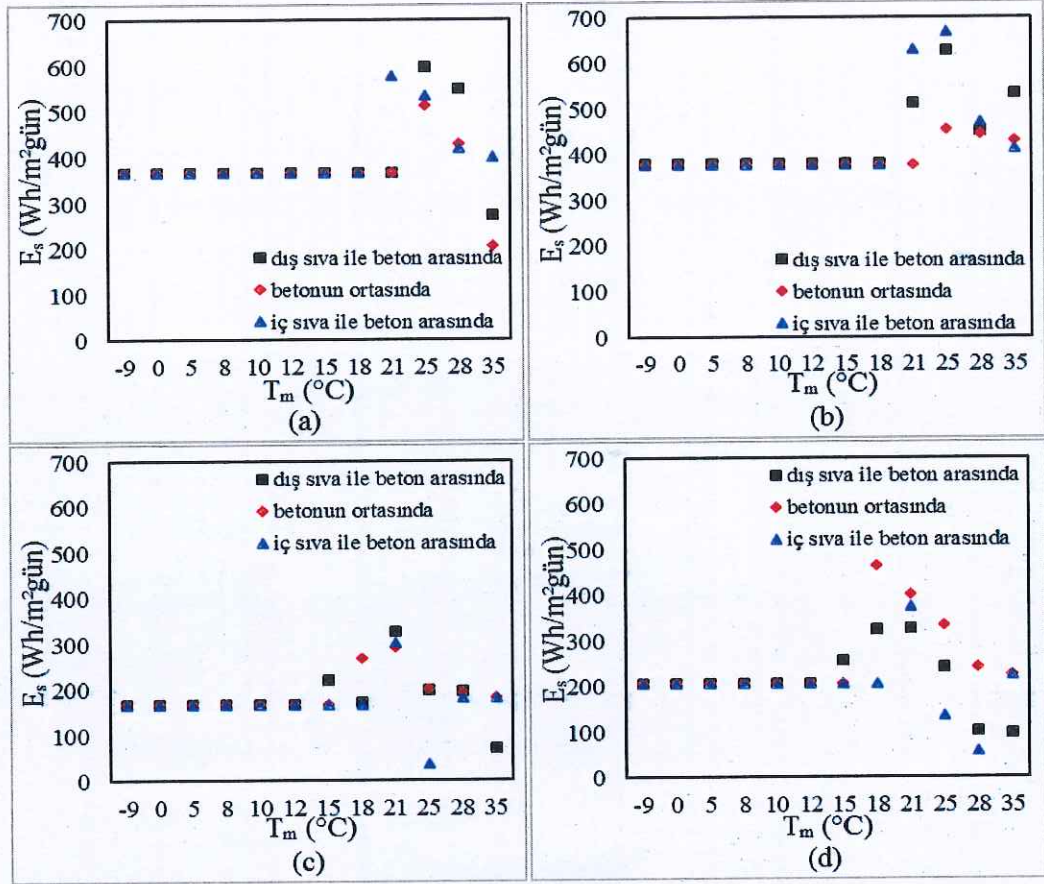
Isıtma ve soğutma koşulunda enerji tasarrufu miktarları, faz değiştiren malzemelerin duvar içerisindeki konumuna bağlı olarak sırasıyla Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de verildi. Şekil 3.2'de görüldüğü gibi, ısıtma koşulunda Adana için erime sıcaklığı 18°C olan RT18HC malzemesinin dış sıva ile beton arasında olması durumunda enerji tasarrufu $246,1 \text{ Wh/m}^2\text{gün}$ iken, aynı malzemenin betonun ortasında olması durumunda enerji tasarrufu $280 \text{ Wh/m}^2\text{gün}$ olduğu görülmektedir. RT18HC malzemesinin iç sıva ile beton arasında olması durumunda malzemenin faz değiştirmede, duvar içerisinde sadece yalıtım malzemesi gibi görev yaptığı ve enerji tasarrufunun $140,3 \text{ Wh/m}^2\text{gün}$ olduğu belirlendi. Buna göre, iklim koşuluna uygun erime sıcaklığında faz değiştiren

malzemenin seçilmesinin yanı sıra faz değıştiren malzemenin duvar içerisindeki konumunun da enerji tasarrufu üzerinde etkili olduğu görölmektedir.



Şekil 3.2. Isıtma iklim koşulunda enerji tasarrufları, a) Adana, b) Batman, c) Artvin, d) Ağrı

Seçilen diğer şehirler için enerji tasarrufu miktarları incelendiğinde, erime sıcaklığı 15°C olan RT15 malzemesinin dış sıva ile beton arasında olması durumunda Batman için maksimum enerji tasarrufu $488,2 \text{ Wh/m}^2\text{gün}$ olarak belirlendi. Aynı malzemenin duvar içerisindeki diğer konumlarında faz değıştirmedeği ve enerji tasarrufunun $293,7 \text{ Wh/m}^2\text{gün}$ olduğu belirlendi. Artvin için erime sıcaklığı 10°C olan RT10HC malzemesinin dış sıva ile beton arasında olması durumunda maksimum enerji tasarrufunun $405,7 \text{ Wh/m}^2\text{gün}$ olduğu, aynı malzemenin diğer konumlarında enerji tasarrufunun $300,8 \text{ Wh/m}^2\text{gün}$ olduğu belirlendi. Erime sıcaklığı 0°C olan RT0 malzemesinin dış sıva ile beton arasında olması durumunda Ağrı için enerji tasarrufunun maksimum olduğu görölmektedir ve enerji tasarrufu $621,1 \text{ Wh/m}^2\text{gün}$ olarak belirlendi.



Şekil 3.3. Soğutma iklim koşulunda enerji tasarrufları, a) Adana, b) Batman, c) Artvin, d) Ağrı

Şekil 3.3’de görüldüğü gibi, soğutma koşulunda Adana ve Batman için enerji tasarrufları erime sıcaklığı 25°C olan RT25HC malzemesinin dış sıva ile beton arasında olması durumunda sırasıyla $598,6 \text{ Wh/m}^2\text{gün}$ ve $626,8 \text{ Wh/m}^2\text{gün}$ olarak belirlendi. Aynı malzemenin betonun ortasında olması durumunda enerji tasarrufları sırasıyla $512,3 \text{ Wh/m}^2\text{gün}$ ve $454,1 \text{ Wh/m}^2\text{gün}$, iç sıva ile beton arasında olması durumunda $534,9 \text{ Wh/m}^2\text{gün}$ ve $669 \text{ Wh/m}^2\text{gün}$ olarak belirlendi. Soğutma koşulunda Artvin ve Ağrı için erime sıcaklığı 21°C olan RT21HC malzemesinin dış sıva ile beton arasında olması durumunda enerji tasarrufları yaklaşık olarak $325,9 \text{ Wh/m}^2\text{gün}$ olduğu belirlendi. Aynı malzemenin betonun ortasında olması durumunda enerji tasarrufları sırasıyla $293,3 \text{ Wh/m}^2\text{gün}$ ve $399,5 \text{ Wh/m}^2\text{gün}$, iç sıva ile beton arasında olması durumunda ise $303,1 \text{ Wh/m}^2\text{gün}$ ve $373,14 \text{ Wh/m}^2\text{gün}$ olarak belirlendi. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’e göre, ısıtma ve soğutma koşulları birlikte değerlendirildiğinde, genellikle enerji tasarrufu miktarlarının en fazla soğutma koşullarında sağlandığı belirlendi. Örneğin, ısıtma koşulunda Adana için erime

sıcaklığı 18°C olan RT18HC malzemesinin duvarda dış sıva ile beton arasına yerleştirilmesi ile enerji tasarrufu 246,1 Wh/m²gün iken soğutma koşulunda aynı malzemenin kullanılması ile enerji tasarrufu 367,3 Wh/m²gün olduğu belirlendi. Aynı şekilde soğutma koşulunda erime sıcaklığı 25°C olan RT25HC malzemesinin duvarda dış sıva ile beton arasına yerleştirilmesi ile enerji tasarrufu 598,6 Wh/m²gün iken ısıtma koşulunda aynı malzemenin kullanılması ile enerji tasarrufu 140 Wh/m²gün olduğu belirlendi.

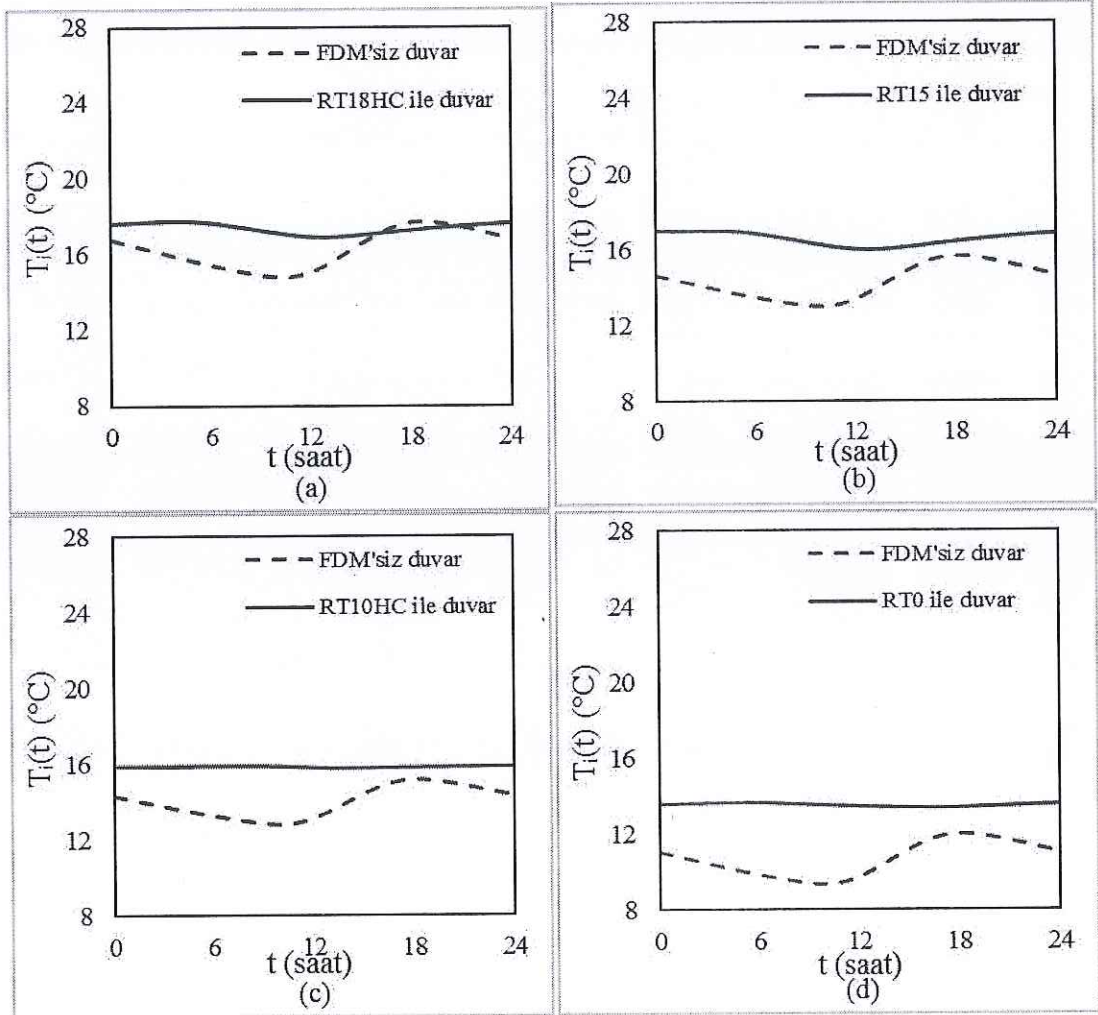
İklim koşullarına uygun erime sıcaklığı ve duvar içerisindeki konum dikkate alınarak, ısıtma ve soğutma koşullarında seçilen şehirler için belirlenen optimum malzemelerin duvarda dış sıva ile beton arasına yerleştirilmesi ile enerji tasarrufu miktarları Tablo 3.4’de verildi.

Tablo 3.4. Maksimum enerji tasarrufları

Tarih (gün/ay)	Şehir	Malzeme	Es (Wh/m ² gün)
21 Ocak (Isıtma)	Adana	RT18HC	246,1
	Batman	RT15	488,2
	Artvin	RT10HC	405,7
	Ağrı	RT0	621,1
21 Temmuz (Soğutma)	Adana	RT25HC	598,6
	Batman	RT25HC	626,8
	Artvin	RT21HC	325,9
	Ağrı	RT21HC	325,8

Tablo 3.4’de görüldüğü gibi, ısıtma koşulunda Adana, Batman, Artvin ve Ağrı için sırasıyla erime sıcaklığı 18°C olan RT18HC, 15°C olan RT15, 10°C olan RT10HC ve 0°C olan RT0 malzemelerinin duvarda dış sıva ile beton arasında olması yerleştirilmesi ile ciddi miktarda enerji tasarrufu sağlayabileceği belirlendi. Ayrıca, soğutma koşulunda Adana ve Batman için erime sıcaklığı 25°C olan RT25HC, Artvin ve Ağrı için erime sıcaklığı 21°C olan RT21HC malzemelerinin duvarda dış sıva ile beton arasına yerleştirilmesi ile enerji tasarrufuna katkı sağladığı belirlendi. Isıtma ve soğutma koşullarında enerji tasarrufu miktarları incelendiğinde, faz değiştiren malzemelerin iç sıva ile beton arasında olması durumunda diğer konumlara nazaran enerji tasarrufuna daha az katkı sağladığı, maksimum enerji tasarruflarının genel olarak malzemelerin dış sıva ile beton arasına yerleştirilmesi ile elde edilebileceği belirlendi.

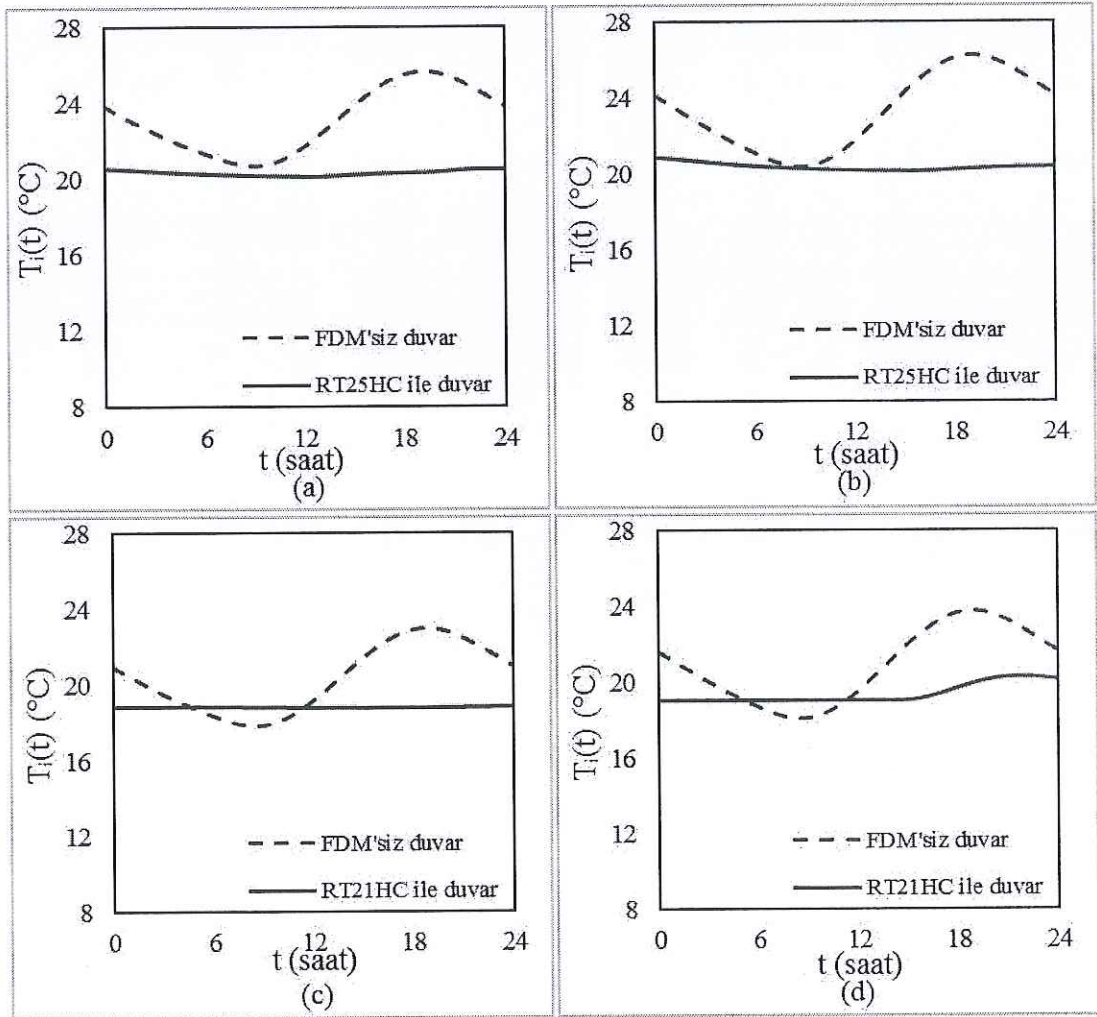
Faz değiştiren malzeme içermeyen duvar ile faz değiştiren malzemeleri içeren duvarların i yüzey sıcaklık grafikleri ısıtma ve soğutma koşulları için sırasıyla şekil 3.4 ve şekil 3.5’de verildi.



şekil 3.4. ısıtma iklim koşulunda i yüzey sıcaklıkları, a) Adana, b) Batman, c) Artvin, d) Ağrı

şekil 3.4 incelendiğinde, ısıtma koşulunda Adana için erime sıcaklığı 18°C olan RT18HC malzemesinin dış sıva ile beton arasına yerleştirilmesiyle duvarın maksimum i yüzey sıcaklığının, faz değiştiren malzeme içermeyen duvarın maksimum i yüzey sıcaklığına göre $0,1^{\circ}\text{C}$ arttığı ve sıcaklık genliklerinin $2,1^{\circ}\text{C}$ azaldığı belirlendi. Batman için erime sıcaklığı 15°C olan RT15 malzemesinin dış sıva ile beton arasına yerleştirilmesiyle duvarın maksimum i yüzey sıcaklığının, faz değiştiren malzeme içermeyen duvarın maksimum i yüzey sıcaklığına göre $1,4^{\circ}\text{C}$ arttığı ve sıcaklık genliklerinin $1,7^{\circ}\text{C}$ azaldığı belirlendi. Artvin için erime sıcaklığı

10°C olan RT10HC malzemesinin dış sıva ile beton arasına yerleştirilmesiyle duvarın maksimum iç yüzey sıcaklığının, faz değiştiren malzeme içermeyen duvarın maksimum iç yüzey sıcaklığına göre 0,7°C arttığı ve sıcaklık genliklerinin 2,2°C azaldığı belirlendi. Ağrı için erime sıcaklığı 0°C olan RT0 malzemesinin dış sıva ile beton arasına yerleştirilmesiyle duvarın maksimum iç yüzey sıcaklığının, faz değiştiren malzeme içermeyen duvarın maksimum iç yüzey sıcaklığına göre 1,7°C arttığı ve sıcaklık genliklerinin 2,4°C azaldığı belirlendi.



Şekil 3.5. Soğutma iklim koşulunda iç yüzey sıcaklıkları, a) Adana, b) Batman, c) Artvin, d) Ağrı

Şekil 3.5 incelendiğinde, soğutma koşulunda erime sıcaklığı 25°C olan RT25HC malzemesinin dış sıva ile beton arasına yerleştirilmesiyle duvarın maksimum iç yüzey sıcaklığının, faz değiştiren malzeme içermeyen duvarın maksimum iç yüzey sıcaklığına göre Adana ve Batman için sırasıyla 5,1°C ve 5,4°C azaldığı ve sıcaklık

genliklerinin $4,6^{\circ}\text{C}$ ve $5,2^{\circ}\text{C}$ azaldığı belirlendi. Erime sıcaklığı 21°C olan RT21HC malzemesinin dış sıva ile beton arasına yerleştirilmesiyle duvarın maksimum iç yüzey sıcaklığının, faz değiştiren malzeme içermeyen duvarın maksimum iç yüzey sıcaklığına göre Artvin ve Ağrı için sırasıyla $4,1^{\circ}\text{C}$ ve $3,5^{\circ}\text{C}$ azaldığı belirlendi. Sıcaklık genliklerinin ise 5°C ve $4,5^{\circ}\text{C}$ azaldığı görüldü.

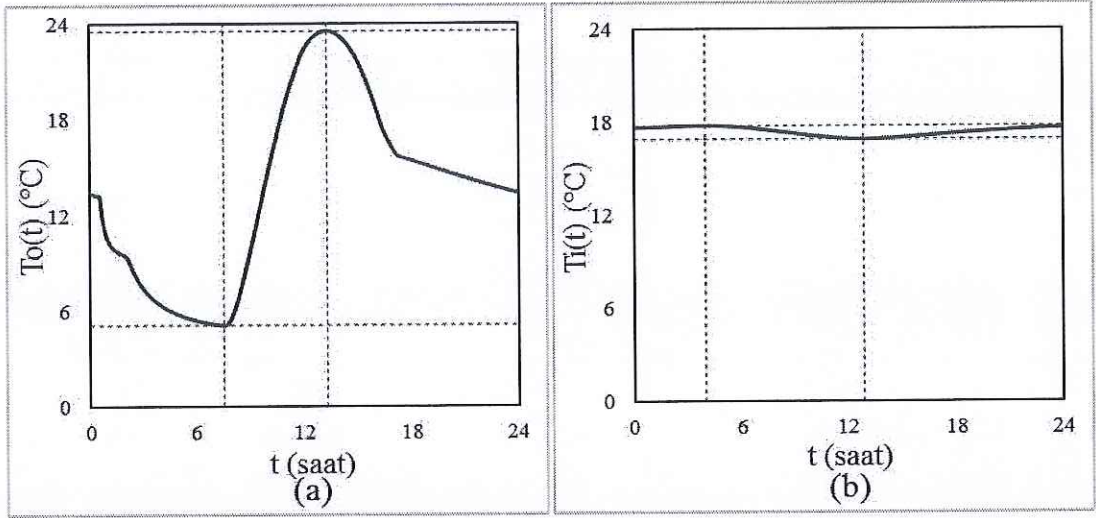
Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'e göre, ısıtma ve soğutma koşulları birlikte değerlendirildiğinde, genellikle iç yüzey sıcaklıklarındaki iyileşmenin ve sıcaklık genliklerindeki azalmaların soğutma koşullarında daha fazla olduğu görülmektedir. Örneğin; ısıtma koşulunda Adana için erime sıcaklığı 18°C olan RT18HC malzemesinin duvarda dış sıva ile beton arasına yerleştirilmesi ile duvarın maksimum iç yüzey sıcaklığının, faz değiştiren malzeme içermeyen duvarın maksimum iç yüzey sıcaklığına göre $0,1^{\circ}\text{C}$ iyileşme görülürken, soğutma koşulunda erime sıcaklığı 25°C olan RT25HC malzemesinin duvarda dış sıva ile beton arasına yerleştirilmesi ile duvarın maksimum iç yüzey sıcaklığının, faz değiştiren malzeme içermeyen duvarın maksimum iç yüzey sıcaklığına göre $5,1^{\circ}\text{C}$ iyileşme olduğu görülmektedir.

Genel olarak, optimum malzemelerin duvarda dış sıva ile beton arasına yerleştirilmesi ile ısıtma koşulunda iç yüzey sıcaklığının $0,1-1,7^{\circ}\text{C}$ arasında arttığı, soğutma koşulunda ise iç yüzey sıcaklığının $3,5-5,4^{\circ}\text{C}$ arasında azaldığı belirlendi. Aynı şekilde ısıtma koşulunda sıcaklık genliklerinde azalmalar $1,7-2,4^{\circ}\text{C}$ arasında iken soğutma koşullarında $4,5-5,2^{\circ}\text{C}$ arasında azalmaların olduğu görüldü.

Enerji tasarrufunun yanı sıra genlik küçültme faktörü ve zaman gecikmesi parametreleri de incelendi. Örneğin, ısıtma koşulunda Adana için erime ve katılaşmanın görüldüğü RT18HC malzemesinin duvarda dış sıva ile beton arasına yerleştirilmesi ile 24 saatlik periyotta dış yüzey sıcaklık ve iç yüzey sıcaklık değişimi Şekil 3.6'da gösterildi.

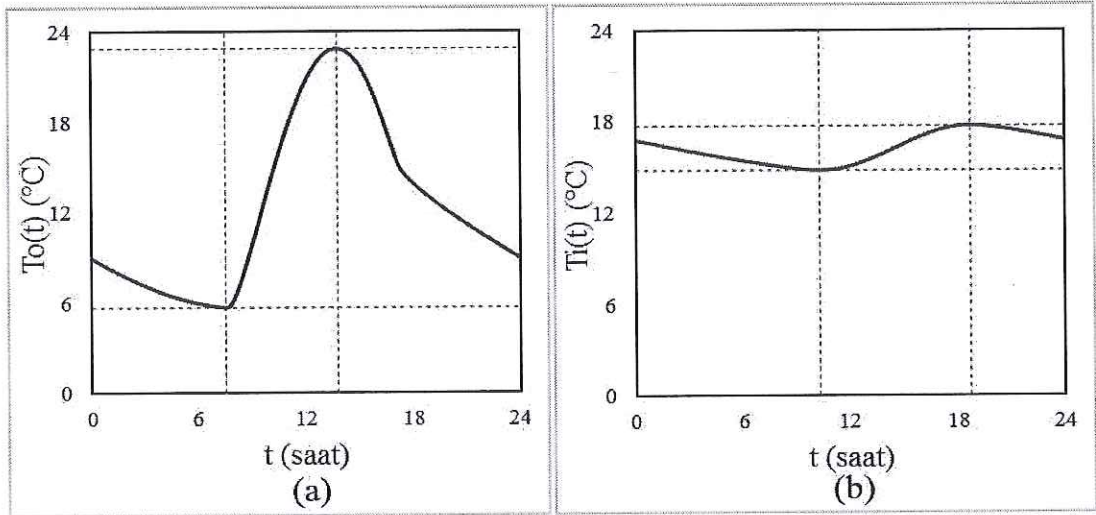
Şekil 3.6'da görüldüğü gibi, iç yüzey sıcaklık genliği yaklaşık $0,9^{\circ}\text{C}$ ve dış yüzey sıcaklık genliği $18,5^{\circ}\text{C}$ olarak belirlendi. İç yüzey sıcaklık değişimi genliğinin dış yüzey sıcaklık değişimi genliğine oranı olarak tanımlanan genlik küçültme faktörü (DF) $0,0469$ olarak belirlendi. Duvarın dış yüzeyinde maksimum sıcaklığın meydana

geldiği saat ile iç yüzeyinde maksimum sıcaklığın meydana geldiği saat arasındaki zaman farkı olarak tanımlanan zaman gecikmesi (TL) 14,7 saat olarak belirlendi.



Şekil 3.6. Isıtma iklim koşulunda Adana için RT18HC malzemesinin dış sıva ile beton arasında olması durumunda, a) dış yüzey sıcaklık, b) iç yüzey sıcaklık değişimi

Faz değiştiren malzeme içermeyen duvar için 24 saatlik periyotta dış yüzey sıcaklık ve iç yüzey sıcaklık değişimi Şekil 3.7’de gösterildi.



Şekil 3.7. Isıtma iklim koşulunda Adana için FDM’siz duvarda, a) dış yüzey sıcaklık, b) iç yüzey sıcaklık değişimi

Şekil 3.7 incelendiğinde, ısıtma koşulunda Adana için faz değiştiren malzeme içermeyen duvarda genlik küçültme faktörü (DF) 0,1703 ve zaman gecikmesi 4,93 saat olarak belirlendi. Buna göre, ısıtma koşulunda Adana için FDM’siz duvarın genlik küçültme faktörü (DF) 0,1703 iken RT18HC malzemesinin dış sıva ile beton

arasında kullanılması ile genlik küçültme faktörünün 0,0469 olduğu belirlendi. Ayrıca, RT18HC malzemesinin dış sıva ile beton arasında kullanılması ile 9,77 saat zaman gecikmesinin olduğu görülmektedir.

Aynı şekilde, ısıtma ve soğutma koşullarında seçilen şehirlerde FDM'siz duvar ve optimum malzemelerin dış sıva ile beton arasına yerleştirilmesi ile elde edilen genlik küçültme faktörleri (DF) ve zaman gecikmeleri (TL) belirlendi ve Tablo 3.5'de verildi.

Tablo 3.5. Genlik küçültme faktörü ve zaman gecikmesi

Tarih	Şehir	Durum	DF	TL (saat)
21 Ocak (Isıtma)	Adana	FDM'siz duvar	0,1703	4,93
		RT18HC ile duvar	0,0469	14,69
	Batman	FDM'siz duvar	0,1702	4,88
		RT15 ile duvar	0,0566	14,52
	Artvin	FDM'siz duvar	0,1676	4,88
		RT10HC ile duvar	0,0086	19,70
	Ağrı	FDM'siz duvar	0,1686	4,93
		RT0 ile duvar	0,0184	16,56
21 Temmuz (Soğutma)	Adana	FDM'siz duvar	0,1901	5,20
		RT25HC ile duvar	0,0155	10,31
	Batman	FDM'siz duvar	0,1878	5,19
		RT25HC ile duvar	0,0235	10,02
	Artvin	FDM'siz duvar	0,1900	5,22
		RT21HC ile duvar	0,0030	13,74
	Ağrı	FDM'siz duvar	0,1885	5,19
		RT21HC ile duvar	0,0405	8,17

Tablo 3.5 incelendiğinde, ısıtma koşulunda Batman için RT15 malzemesinin dış sıva ile beton arasında kullanılması ile genlik küçültme faktörü 0,0566 iken, faz değiştiren malzeme içermeyen duvar için genlik küçültme faktörünün 0,1702 olduğu belirlendi. RT15 malzemesinin kullanılması ile zaman gecikmesi 14,52 saat iken, faz değiştiren malzeme içermeyen duvarda zaman gecikmesi 4,88 saat olarak belirlendi. Buna göre, 9,64 saat zaman gecikmesinin olduğu görülmektedir. Artvin için RT10HC malzemesinin dış sıva ile beton arasında kullanılması ile genlik küçültme faktörü 0,0086 iken, faz değiştiren malzeme içermeyen duvar için genlik küçültme faktörünün 0,1676 olduğu belirlendi. RT10HC malzemesinin kullanılması ile zaman

gecikmesi 19,7 saat iken, faz değiştiren malzeme içermeyen duvarda zaman gecikmesi 4,88 saat olarak belirlendi. Buna göre, 14,82 saat zaman gecikmesinin olduğu görölmektedir. Ağrı için ise RT0 malzemesinin dış sıva ile beton arasında kullanılması ile genlik küçültme faktörünün 0,0184 olarak belirlendi. Zaman gecikmesinin ise faz değiştiren malzeme içermeyen duvar ile kıyasla 11,62 saat arttığı belirlendi.

Soğutma koşulunda ise Adana ve Batman için RT25HC malzemesinin dış sıva ile beton arasında kullanılması ile genlik küçültme faktörlerinin sırasıyla 0,0155 ve 0,0235 olduğu ve zaman gecikmelerinin ise malzemenin kullanılması ile sırasıyla 5,11 saat ve 4,84 saat arttığı belirlendi. Artvin ve Ağrı için RT21HC malzemesinin dış sıva ile beton arasında kullanılması ile genlik küçültme faktörleri sırasıyla 0,0030 ve 0,0405 olarak belirlendi. Zaman gecikmelerinde ise sırasıyla 8,52 saatlik ve 3 saatlik artışın olduğu belirlendi.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, erime sıcaklıkları sırasıyla -9°C , 0°C , 5°C , 8°C , 10°C , 12°C , 15°C , 18°C , 21°C , 25°C , 28°C ve 35°C olan 12 farklı faz değiştiren malzemenin (RT-9HC, RT0, RT5HC, RT8HC, RT10HC, RT12, RT15, RT18HC, RT21HC, RT25HC, RT28HC ve RT35HC) termofiziksel özelliklerinin ve malzemelerin dış sıva ile beton arasında, betonun ortasında ve iç sıva ile beton arasında olmak üzere bina duvarı içerisindeki konumunun enerji tasarrufu, genlik küçültme faktörü ve zaman gecikmesi üzerindeki etkisi bir boyutlu açık sonlu farklar yöntemi kullanılarak sayısal olarak incelendi.

İklim koşulu olarak, ısıtma durumunda 21 Ocak, soğutma durumunda 21 Temmuz günleri seçildi ve Türkiye'nin farklı iklim bölgesinden seçilen şehirlere (Adana, Batman, Artvin ve Ağrı) ait dış hava sıcaklığı ve güneş ışınımının günlük değişimi kullanıldı.

Çalışmanın sonuçları incelendiğinde, faz değiştiren malzemenin termofiziksel özelliklerinin, malzemenin duvar içerisindeki konumunun ve iklim koşullarının, enerji tasarrufu, genlik küçültme faktörü ve zaman gecikmesi üzerinde etkili olduğu görüldü. Faz değiştiren malzemelerin kullanabilirliği, seçilen şehirlerin iklim koşullarına ve malzemenin duvar içerisindeki konumuna göre farklılık gösterse de genel olarak ısıtma koşulunda erime sıcaklığı -9°C ile 21°C arasında olan malzemelerde, soğutma koşulunda ise erime sıcaklığı 15°C ile 35°C arasında olan malzemelerde erime ve katılaşmanın bir başka deyişle faz değişiminin meydana geldiği görüldü.

Maksimum enerji tasarrufu sağlamak için iklim koşullarına uygun erime sıcaklığında malzemelerin seçilmesi gerektiği belirlendi. Isıtma koşulunda, erime sıcaklıkları 18°C , 15°C , 10°C ve 0°C olan RT18HC, RT15, RT10HC ve RT0 malzemelerinin sırasıyla Adana, Batman, Artvin ve Ağrı için uygun olduğu görülürken soğutma koşulunda erime sıcaklığı 25°C olan RT25HC malzemesinin Adana ve Batman,

erime sıcaklığı 21°C olan RT21HC malzemesinin Artvin ve Ağrı için uygun olduğu belirlendi.

Ayrıca, ısıtma ve soğutma koşullarında uygun erime sıcaklığında faz değiştiren malzemelerin betonun ortasına ya da iç sıva ile beton arasına yerleştirilmesine kıyasla dış sıva ile beton arasına yerleştirilmesi ile enerji tasarrufuna ciddi miktarda katkı sağladığı sonucuna varıldı. Optimum faz değiştiren malzemenin dış sıva ile beton arasına yerleştirilmesi ile ısıtma koşulunda 246,1-621,1 Wh/m²gün arasında, soğutma koşulunda 325,8-626,8 Wh/m²gün arasında enerji tasarrufuna katkı sağladığı sonucuna varıldı. Genel olarak, faz değiştiren malzemelerin ısıtma koşulunda kullanılmasına kıyasla soğutma koşulunda kullanılmasının enerji tasarrufuna etkisinin daha fazla olduğu görüldü.

Isıtma koşulunda iç yüzey sıcaklığının 0,1-1,7°C arasında arttığı, soğutma koşulunda ise iç yüzey sıcaklığının 3,5-5,4°C arasında azaldığı belirlendi ve bu durumun termal konforu arttırdığı sonucuna varıldı. Ayrıca, faz değiştiren malzemelerin erime ve katılma süresi boyunca sıcaklığının erime sıcaklığında sabit kalması nedeniyle ısıtma koşulunda 1,7-2,4°C arasında, soğutma koşulunda ise 4,5-5,2°C arasında duvarın iç yüzey sıcaklık genliklerinde azalmaların olduğu belirlendi.

Aynı şekilde, FDM'siz duvarda ısıtma koşulunda genlik küçültme faktörü 0,1676-0,1703 arasında iken optimum malzemelerin dış sıva ile beton arasına yerleştirilmesi ile genlik küçültme faktörü 0,0086-0,0566 arasında olduğu belirlendi. Soğutma koşulunda ise FDM'siz duvarda genlik küçültme faktörü 0,1878-0,1901 arasında iken optimum malzemelerin dış sıva ile beton arasına yerleştirilmesi ile genlik küçültme faktörü 0,0030-0,0405 arasında olduğu belirlendi. Buna bağlı olarak, ısıtma koşulunda 9,6-14,8 saat, soğutma koşulunda 3-8,5 saat arasında zaman gecikmelerinin arttığı sonucuna varıldı.

Sonuç olarak, faz değiştiren malzemenin termofiziksel özelliklerinin ve malzemenin duvar içerisindeki konumunun enerji tasarrufu, genlik küçültme faktörü ve zaman gecikmesi üzerindeki etkisinin belirlenmesinin seçilen yerin enlem ve boylamına, seçilen güne ait iklim verilerine göre değişkenlik gösterdiği tespit edilmiş olup, Türkiye'nin tüm şehirleri için bir yıl boyunca iklim verilerini göz önüne alan bir çalışmanın yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Dinçer İ., Rosen M. A., *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*, 2nd ed., A John Wiley and Sons, United Kingdom, 2011.
- [2] Jeon J., Seo J., Jeong S., Kim S., PCM Application Methods for Residential Building using Radiant Floor Heating Systems, *J Therm Anal Calorim*, DOI: 10.1007/s10973-012-2291-9.
- [3] Zalba B., Marin J. M., Cabeza L. F., Mehling H., Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications, *Applied Thermal Engineering*, DOI: 10.1016/S13594311(02)00192-8.
- [4] Sharma A., Tyagi V. V., Chen C. R., Buddhi D., Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, DOI: 10.1016/j.rser.2007.10.005.
- [5] Gracia A., Cabeza L. F., Phase Change Materials and Thermal Energy Storage for Buildings, *Energy and Buildings*, DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.06.007.
- [6] Feldman D., Shapira M. M., Banu D., Organic Phase Change Materials for Thermal Energy Storage, *Solar Energy Materials*, DOI:10.1016/01651633(86) 90023-7.
- [7] Schröder J., Gawron K., Latent Heat Storage, *Energy Research*, DOI: 10.1002/er.4440050202.
- [8] Tyagi V. V., Buddhi D., PCM Thermal Storage in Buildings: A State of Art, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, DOI:10.1016/j.rser.2005.10.002.
- [9] Baetens R., Jelle B. P., Gustavsen A., Phase Change Materials for Building Applications: A-State-of-The-Art Review, *Energy and Buildings*, DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.03.026.
- [10] Li J., Zhang G., Wang J., Investigation of A Eutectic Mixture of Sodium Acetate Trihydrate and Urea as Latent Heat Storage, *Solar Energy*, DOI: 10.1016/0038-092X (91)90112-A.
- [11] Abhat A., Aboul-Enein S., Malatidis N. A., Heat of Fusion Storage Systems for Solar Heating Applications, *Thermal Storage of Solar Energy*, DOI: 10.1007/978-94-009-8302-1_17.
- [12] Morcos V. H., Investigation of A Latent Heat Thermal Energy Storage System, *Solar and Wind Technology*, DOI: 10.1016/0741-983X (90)90087-I.

- [13] Sokolov M., Keizman Y., Performance Indicators for Solar Pipes with Phase Change Storage, *Solar Energy*, DOI: 10.1016/0038-092X (91)90027-T.
- [14] Rabin Y., Bar-Niv I., Korin E., Mikic B., Integrated Solar Collector Storage System Based on A Salt-Hydrate Phase-Change Material, *Solar Energy*, DOI: 10.1016/0038-092X (95)00074-2.
- [15] Enibe S. O., Performance of A Natural Circulation Solar Air Heating System with Phase Change Material Energy Storage, *Renewable Energy*, DOI: 10.1016/S0960-1481(01)00173-2.
- [16] Hawes D. W., Feldman D., Banu D., Latent Heat Storage in Buildings Materials, *Energy and Buildings*, DOI: 10.1016/0378-7788(93)90040-2.
- [17] Inaba H., Tu P., Evaluation of Thermophysical Characteristics on Shape-Stabilized Paraffin as A Solid-Liquid Phase Change Material, *Heat and Mass Transfer*, DOI: 10.1007/s002310050126.
- [18] Lee C. H., Choi H. K., Crystalline Morphology in High Density Polyethylene/ Paraffin Blend for Thermal Energy Storage, *Polymer Composites*, DOI: 10.1002/pc.10143.
- [19] Peippo K., Kauranen P., Lund P. D., A Multicomponent PCM Wall Optimized for Passive Solar Heating, *Energy and Buildings*, DOI: 10.1016/03787788 (91)90009-R.
- [20] Ismail K. A. R., Henriquez J. R., Thermally Effective Windows with Moving Phase Change Material Curtains, *Applied Thermal Engineering*, DOI: 10.1016/S1359-4311(01)00058-8.
- [21] Ismail K. A. R., Jesus A. B., Parametric Study of Solidification of PCM around A Cylinder for Ice-Bank Applications, *International Journal of Refrigeration*, DOI: 10.1016/S0140-7007(00)00059-1.
- [22] Wakiltojjar S. M., Saman W., Analysis and Modelling of A Phase Change Storage System for Air Conditioning Applications, *Applied Thermal Engineering*, DOI: 10.1016/S1359-4311(00)00037-5.
- [23] Omer S. A., Riffat S. B., Ma X., Experimental Investigation of A Thermoelectric Refrigeration System Employing A Phase Change Material Integrated with Thermal Diode (Thermosyphons), *Applied Thermal Engineering*, DOI: 10.1016/S1359-4311(01)00010-2.
- [24] Riffat S. B., Omer S. A., Ma X., A Novel Thermoelectric Refrigeration System Employing Heat Pipes and A Phase Change Material: An Experimental Investigation, *Renewable Energy*, DOI: 10.1016/S0960-1481(00)00170-1.
- [25] Bedecarrats J. P., Strub F., Falcon B., Dumas J. P., Phase-Change Thermal Energy Storage using Spherical Capsules: Performance of A Test Plant, *International Journal of Refrigeration*, DOI: 10.1016/0140-7007(95)00080-1.

- [26] Farid M. M., Husian R. M., An Electrical Storage Heater using The Phase-Change Method of Heat Storage, *Energy Conversion and Management*, DOI: 10.1016/0196-8904(90)90003-H.
- [27] Costa M., Buddhi D., Oliva A., Numerical Simulation of A Latent Heat Thermal Energy Storage System with Enhanced Heat Conduction, *Energy Conversion and Management*, DOI: 10.1016/S0196-8904(96)00193-8.
- [28] Mehling H., Cabeza L. F., Hippeli S., Hiebler S., PCM-Module to Improve Hot Water Heat Stores with Stratification, *Renewable Energy*, DOI: 10.1016/S0960-1481(02)00108-8.
- [29] Esen M., Durmuş A., Durmuş A., Geometric Design of Solar-Aided Latent Heat Store Depending on Various Parameters and Phase Change Materials, *Solar Energy*, DOI: 10.1016/S0038-092X (97)00104-7.
- [30] Kürklü A., Energy Storage Applications in Greenhouses by Means of Phase Change Materials (PCMs): A Review, *Renewable Energy*, DOI: 10.1016/S0960-1481(97)83337-X.
- [31] Pal D., Joshi Y., Application of Phase Change Materials for Passive Thermal Control of Plastic Quad Flat Packages: A Computational Study, *Numerical Heat Transfer*, DOI: 10.1080/10407789608913826.
- [32] Koschenz M., Lehmann B., Development of A Thermally Activated Ceiling Panel with PCM for Application in Lightweight and Retrofitted Buildings, *Energy and Buildings*, DOI: 10.1016/j.enbuild.2004.01.029.
- [33] Shilei L., Neng Z., Guohui F., Impact of Phase Change Wall Room on Indoor Thermal Environment in Winter, *Energy and Buildings*, DOI: 10.1016/j.enbuild.2005.02.007.
- [34] Ahmad M., Bontemps A., Sallee H., Quenard D., Experimental Investigation and Computer Simulation of Thermal Behaviour of Wallboards Containing A Phase Change Material, *Energy and Buildings*, DOI: 10.1016/j.enbuild.2005.07.008.
- [35] Cabeza L. F., Castellon C., Nogues M., Medrano M., Leppers R., Zubillaga O., Use of Microencapsulated PCM in Concrete Walls for Energy Savings, *Energy and Buildings*, DOI: 10.1016/j.enbuild.2006.03.030.
- [36] Halford C. K., Boehm R. F., Modeling of Phase Change Material Peak Load Shifting, *Energy and Buildings*, DOI: 10.1016/j.enbuild.2006.07.005.
- [37] Pasupathy A., Velraj R., Effect of Double Layer Phase Change Material in Building Roof for Year Round Thermal Management, *Energy and Buildings*, DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.02.016.
- [38] Xiao W., Wang X., Zhang Y., Analytical Optimization of Interior PCM for Energy Storage in A Lightweight Passive Solar Room, *Applied Energy*, DOI: 10.1016/j.apenergy.2008.12.011.

- [39] Kuznik F., Virgone J., Noel J., Optimization of A Phase Change Material Wallboard for Building Use, *Applied Thermal Engineering*, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2007.10.012.
- [40] Athienitis A. K., Liu C., Hawes D., Banu D., Feldman D., Investigation of The Thermal Performance of A Passive Solar Test-Room with Wall Latent Heat Storage, *Building and Environment*, DOI: 10.1016/S0360-1323(97)00009-7.
- [41] Huang M. J., Eames P. C., Hewitt N. J., The Application of A Validated Numerical Model to Predict The Energy Conservation Potential of using Phase Change Materials in The Fabric of A Building, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, DOI: 10.1016/j.solmat.2006.02.002.
- [42] Diaconu B. M., Cruceru M., Novel Concept of Composite Phase Change Material Wall System for Year-Round Thermal Energy Savings, *Energy and Buildings*, DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.05.012.
- [43] Abhat A., Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials, *Solar Energy*, DOI: 10.1016/0038-092X (83)90186-X.
- [44] Rubitherm Technologies GmbH, Berlin, <https://www.rubitherm.eu/en/> (Ziyaret tarihi: 10 Ağustos 2017).
- [45] Bulut H., Büyükalaca O., Yılmaz T., New Models for Simulating Daily Minimum, Daily Maximum and Hourly Outdoor Temperatures, *Proceedings of the First International Exergy, Energy and Environment Symposium*, İzmir, Turkey, 13-17 July 2003.
- [46] Bakırcı K., Estimation of Solar Radiation by Using ASHRAE Clear-Sky Model in Erzurum, Turkey, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, DOI: 10.1080/15567030701522534.
- [47] Bulut H., Büyükalaca O., Simple Model for The Generation of Daily Global Solar-Radiation Data in Turkey, *Applied Energy*, DOI: 10.1016/j.apenergy.2006.10.003.
- [48] Al-Khawaja M. J., Determination and Selecting The Optimum Thickness of Insulation for Buildings in Hot Countries by Accounting for Solar Radiation, *Applied Thermal Engineering*, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2004.03.019.
- [49] Yumrutaş R., Ünsal M., Kanoğlu M., Periodic Solution of Transient Heat Flow Through Multilayer Walls and Flat Roofs by Complex Finite Fourier Transform Technique, *Building and Environment*, DOI: 10.1016/j.buildenv.2004.09.005.
- [50] Swinbank W. C., Long-Wave Radiation from Clear Skies, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, DOI: 10.1002/qj.49708938105.

- [51] Mi X., Liu R., Cui H., Memon S. A., Xing F., Lo Y., Energy and Economic Analysis of Building Integrated with PCM in Different Cities of China, *Applied Energy*, DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.05.032.
- [52] TS 825, Binalarda Isı Yalıtım Kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2008.
- [53] Asan H., Numerical Computation of Time Lags and Decrement Factors for Different Building Materials, *Building and Environment*, DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.02.020.
- [54] Çengel Y. A., *Heat and Mass Transfer*, 3rd ed., McGraw-Hill, Nevada, 2006.
- [55] Zhou D., Zhao C. Y., Tian Y., Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials (PCMs) in Building Applications, *Applied Energy*, DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.08.025.
- [56] Solomon A. D., An Easily Computable Solution to A Two-Phase Stefan Problem, *Solar Energy*, DOI: 10.1016/0038-092X(79)90077-X.
- [57] Faraji M., Numerical Computation of Solar Heat Storage in Phase Change Material/Concrete Wall, *International Journal of Energy and Environment*, 2014, 5(3), 353-360.
- [58] Zwanzig S. D., Lian Y., Brehob E. G., Numerical Simulation of Phase Change Material Composite Wallboard in A Multi-layered Building Envelope, *Energy Conversion and Management*, DOI: 10.1016/j.enconman.2013.02.003.
- [59] Zhou D. Shire G. S. F., Tian Y., Parametric Analysis of Influencing Factors in Phase Change Material Wallboard (PCMW), *Applied Energy*, DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.12.059.
- [60] Izquierdo-Barrientos M. A., Belmonte J. F., Rodriguez-Sanchez D., Molina A. E., Almendros-Ibanez J. A., A Numerical Study of External Building Walls Containing Phase Change Materials (PCM), *Applied Thermal Engineering*, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.02.038.

EKLER

Ek-A: Fonksiyon parametreleri [45]

İLLER	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	İLLER	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
Adana	25,27	15,28	14,27	5,04	Kırşehir	17,11	4,26	5,34	-4,61
Adapazarı	19,25	9,08	9,78	1,99	Kilis	23,07	9,36	11,67	1,98
Adıyaman	22,76	7,94	11,81	0,65	Kocaeli	19,15	8,90	10,74	2,54
Afyon	17,00	4,65	5,21	-3,62	Konya	17,54	4,54	5,26	-4,96
Ağrı	13,07	-4,49	-0,43	-13,99	Kütahya	16,75	4,81	4,85	-3,46
Aksaray	18,32	5,56	5,81	-3,88	Malatya	19,10	3,75	8,33	-2,95
Amasya	19,70	7,63	7,35	-1,24	Mersin	22,98	14,79	15,34	6,21
Ankara	17,57	4,72	6,14	-3,28	Muğla	21,06	8,89	9,37	0,05
Antakya	23,25	13,47	13,68	3,73	Muş	15,68	-2,52	3,50	-9,95
Antalya	24,01	13,88	12,51	3,95	Niğde	17,14	4,64	4,95	-4,74
Artvin	16,71	6,70	7,73	-5,48	Ordu	18,19	9,53	10,67	2,51
Aydın	24,63	12,86	11,50	3,24	Rize	17,67	9,38	10,82	2,45
Balıkesir	20,10	8,66	9,17	0,50	Samsun	17,72	9,55	10,67	2,77
Bartın	18,31	8,63	7,27	-0,52	Siirt	21,46	6,10	10,99	-0,96
Batman	23,54	7,49	9,94	-0,85	Sinop	17,03	8,43	11,20	3,17
Bilecik	17,45	6,03	7,81	-0,59	Sivas	15,02	1,11	3,19	-6,50
Bingöl	18,23	1,53	6,55	-5,48	Şanlıurfa	23,95	9,37	12,59	1,22
Bitlis	15,55	0,36	4,38	-6,42	Tekirdağ	17,67	7,52	9,97	1,29
Bursa	19,93	9,00	8,88	0,80	Tokat	18,34	6,64	6,86	-1,69
Çanakkale	19,29	8,42	10,79	2,31	Trabzon	17,70	9,65	11,47	3,49
Çankırı	17,80	4,18	4,51	-4,56	Tunceli	18,64	2,58	6,84	-4,86
Çorum	17,15	4,93	3,76	-4,36	Uşak	18,52	6,59	6,83	-1,81
Denizli	22,01	9,88	10,76	1,48	Van	14,58	1,08	3,73	-7,53
Diyarbakır	22,16	6,25	8,60	-3,00	Yalova	19,11	9,49	9,63	1,95
Edirne	19,30	6,72	7,98	-1,10	Yozgat	14,31	2,07	3,82	-1,19
Elâzığ	18,68	3,05	7,23	-4,00	Zonguldak	16,60	8,34	10,22	2,58
Erzincan	16,70	2,17	4,76	-6,04					
Erzurum	11,94	-4,19	-1,91	-14,39					
Gaziantep	21,61	7,51	9,21	-1,60					
Gümüşhane	15,62	2,75	4,03	-5,75					
Hakkâri	14,80	-1,16	5,09	-8,22					
Iğdır	19,07	3,75	5,67	-6,45					
Isparta	18,22	5,93	5,46	-3,06					
İstanbul	18,29	8,08	10,71	2,48					
İzmir	22,56	11,84	13,40	4,74					
K. maraş	22,38	8,95	11,31	0,72					
Karaman	18,46	5,26	5,20	-4,32					
Kars	11,69	-3,62	-1,47	-13,89					
Kastamonu	15,81	3,72	4,20	-4,27					
Kayseri	17,54	4,24	2,78	-6,23					
Kırıkkale	17,85	4,65	6,50	-3,04					

Ek-B: Türkiye'nin 67 ili için ısıtma (21 Ocak) ve soğutma (21 Temmuz) durumuna göre hesaplanan günlük maksimum ve minimum sıcaklıklar

	21 Ocak		21 Temmuz			21 Ocak		21 Temmuz	
İLLER	T _{max}	T _{min}	T _{max}	T _{min}	İLLER	T _{max}	T _{min}	T _{max}	T _{min}
Adana	15,30	5,06	35,23	23,47	Kayseri	4,27	-6,21	30,80	11,76
Adapazarı	9,10	2,01	29,39	17,55	Kırıkkale	4,68	-3,02	31,01	16,01
Adıyaman	7,98	0,68	37,54	22,94	Kırşehir	4,29	-4,59	29,92	15,26
Afyon	4,68	-3,60	29,31	14,01	Kilis	9,39	2,00	36,74	21,33
Ağrı	-4,45	-13,96	30,58	13,10	Kocaeli	8,92	2,56	29,37	18,92
Aksaray	5,59	-3,86	31,04	15,47	Konya	4,57	-4,94	30,50	15,45
Amasya	7,66	-1,22	31,73	15,91	Kütahya	4,84	-3,44	28,65	13,14
Ankara	4,75	-3,26	30,38	15,53	Malatya	3,79	-2,92	34,40	19,58
Antakya	13,49	3,75	33,00	23,60	Mersin	14,81	6,23	31,15	24,44
Antalya	13,90	3,97	34,11	21,04	Muğla	8,92	0,07	33,19	18,66
Artvin	6,72	-1,17	26,69	13,09	Muş	-2,48	-9,92	33,83	16,91
Aydın	12,89	3,26	36,36	19,74	Niğde	4,67	-4,72	29,60	14,61
Balıkesir	8,69	0,52	31,51	17,81	Ordu	9,55	2,53	26,82	18,81
Bartın	8,65	-0,50	27,96	15,04	Rize	9,40	2,47	25,94	19,16
Batman	7,53	-0,82	39,54	20,70	Samsun	9,57	2,79	25,87	18,55
Bilecik	6,06	-0,57	28,84	16,18	Siirt	6,14	-0,93	36,77	22,90
Bingöl	1,57	-5,45	34,88	18,54	Sinop	8,45	3,19	25,60	19,21
Bitlis	0,40	-6,39	30,69	15,15	Sivas	1,14	-6,48	28,89	12,85
Bursa	9,03	0,82	30,83	16,94	Şanlıurfa	9,40	1,25	38,49	23,93
Çanakkale	8,45	2,33	30,13	19,24	Tekirdağ	7,54	1,31	27,79	18,62
Çankırı	4,21	-4,54	31,38	13,55	Tokat	6,67	-1,67	30,00	15,38
Çorum	4,96	-4,34	29,33	11,86	Trabzon	9,67	3,51	25,73	19,43
Denizli	9,91	1,50	34,10	20,01	Tunceli	2,62	-4,83	34,65	18,50
Diyarbakır	6,29	-2,97	38,02	20,17	Uşak	6,62	-1,79	30,41	15,44
Edirne	6,75	-1,08	31,84	17,03	Van	1,11	-7,50	28,04	14,96
Elâzığ	3,09	-3,97	34,26	18,43	Yalova	9,51	1,97	28,70	17,29
Erzincan	2,20	-6,01	31,19	15,53	Yozgat	2,10	-5,46	26,51	16,62
Erzurum	-4,15	-14,36	28,02	10,53	Zonguldak	8,36	2,60	24,84	17,84
Gaziantep	7,54	-1,57	35,67	19,99					
Gümüşhane	2,78	-5,73	28,45	13,78					
Hakkâri	-1,12	-8,19	30,71	18,36					
Iğdır	3,79	-6,42	34,34	17,75					
Isparta	5,96	-3,04	30,47	13,95					
İstanbul	8,10	2,50	28,47	18,92					
İzmir	11,87	4,76	33,25	22,03					
K. maraş	8,98	0,75	35,77	21,87					
Karaman	5,29	-4,30	31,62	14,69					
Kars	-3,58	-13,86	26,95	10,91					
Kastamonu	3,75	-4,25	27,86	12,64					

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Bilgin F., Arıcı M., Bora M. Ö., Çoban O., A Numerical Investigation on Thermal Conductivity of Silicon Nitrate/Silicon Rubber Composite, *16th International Materials Symposium*, Pamukkale, Turkey, 12-14 October 2016.

Bilgin F., Arıcı M., Effect of Phase Change Materials on Time Lag, Decrement Factor and Heat-Saving, *3rd International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering*, Antalya, Turkey, 19-24 October 2016.

Bilgin F., Arıcı M., Nizetic S., Numerical Investigations of Photovoltaic Panel Coupled with Phase Change Material, *9th International Exergy, Energy and Environment Symposium*, Split, Croatia, 14-17 May 2017.

ÖZGEÇMİŞ

1993 yılında Terme/Samsun'da doğdu. İlk öğrenimine Ünye/Ordu'da başlayarak ilk öğrenimini Suşehri/Sivas'ta, orta ve lise öğrenimini Fatsa/Ordu'da tamamladı. 2011 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2015 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 2015 yılında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Termodinamik ve Isı Tekniği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı ve 2017 yılında Yüksek Lisans Tez aşamasındadır.