



Evaluation of type mosque projects in Turkey in terms of indoor air temperature and energy consumption according to degree day zones: Suggestions for improvement using phase change materials

Caner Yetiş*^{ID}

Department of Architecture and Urban Planning, Vocational School of Technical Sciences, Bitlis Eren University, 13000, Bitlis, Türkiye

Highlights:

- Improvement of indoor air temperature in six different degree day zones
- Use of phase change materials in building shell
- Comparison of energy consumption in mosque buildings

Keywords:

- Indoor air temperature
- Mosque buildings
- Climate zones
- Phase change material
- EnergyPlus software

Article Info:

Research Article

Received: 12.12.2024

Accepted: 13.04.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1600452

Correspondence:

Author: Caner Yetiş
e-mail: cyetis@beu.edu.tr
phone: +90 538 717 7107

Graphical/Tabular Abstract

In today's conditions of high energy demand, designing mosque buildings without considering climatic parameters creates economic and environmental problems. This situation is particularly problematic in terms of thermal comfort. Phase change materials (PCMs) can reduce heating and cooling loads by stabilizing indoor temperatures. As part of the study, thermal comfort monitoring was carried out in summer and winter periods by applying phase change materials in the 1st, 2nd, 3rd, 4th, 5th and 6th climate zones selected in Turkey (Figure A). The results showed that even when building the same type of mosque project in different climates, integrating PCMs into the building envelope can improve thermal comfort.

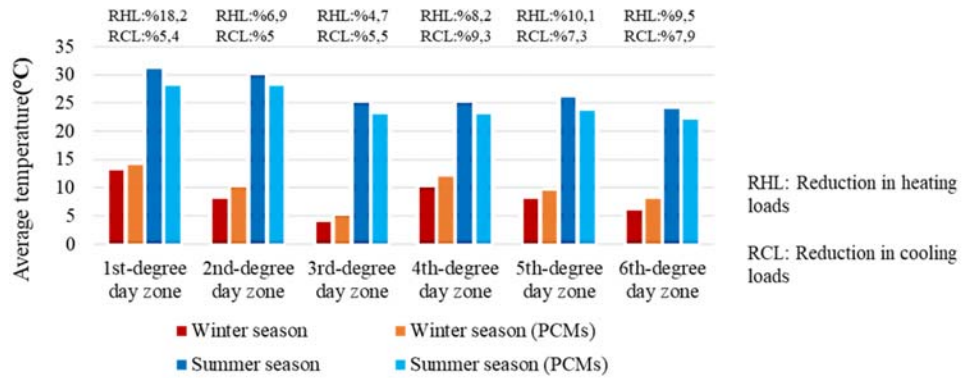


Figure A. Average change of indoor thermal comfort of PCMs-added mosques in six different climate zones

Purpose: Due to their high aspect ratio and fixed orientation, mosque buildings are considered weak structures in terms of thermal comfort. This study aims to improve indoor thermal comfort by transforming the restrictive elements in mosque design into advantages.

Theory and Methods: The study discusses 420-seat-type mosque projects in six different climatic zones in Turkey. Then, paraffin PCMs was added along the south wall of these buildings, and simulations were carried out with EnergyPlus. A numerical model verified the simulation results. CFD software was also used to determine the temperature distribution inside the building.

Results: According to the data obtained, it was determined that the thermal comfort in mosque buildings with PCMs added provides an improvement of 1.8-3.4 during the summer period in all climatic zones in the summer season and an improvement of 1-3 in the winter period, reducing heating and cooling loads. When the CFD results are analyzed, it is seen that the FDM material increases the surface temperature in the range of 1.4-2 °C on the south wall. It was determined that the regions where the amount of heat radiation emitted by the FDM material to the interior was the highest were the 1st, 2nd, and 4th degree climate zones, respectively.

Conclusion: When the findings within the scope of the study are analyzed, it is seen that the PCMs material integrated into the wall improves indoor thermal comfort and provides indoor heat balance. It is also clear that the use of PCMs provides economic improvements by reducing energy consumption. As a result, it is important that the FDM material is favorably integrated into the building envelope.



Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi

Journal of The Faculty of Engineering
and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Türkiye’deki tip cami projelerinin derece gün bölgelerine göre iç mekân hava sıcaklığı ve enerji tüketimi açısından değerlendirilmesi: Faz değiştirici malzeme kullanılarak iyileştirme önerisi

Caner Yetiş*^{ID}

Bitlis Eren Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 13000, Bitlis, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Altı farklı derece gün bölgesinde iç mekân hava sıcaklığının iyileştirilmesi
- Yapı kabuğunda faz değiştirici malzeme kullanımı
- Cami yapılarında enerji tüketiminin karşılaştırılması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 12.12.2024

Kabul: 13.04.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1600452

Anahtar Kelimeler:

İç mekân hava sıcaklığı,
cami yapıları, iklim
bölgeleri, faz değiştirici
malzeme,
EnergyPlus programı

ÖZ

Bu çalışmada Türkiye’de bulunan altı farklı iklim bölgesinde yer alan camilerin iç mekân sıcaklık ve enerji tüketimi analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada her bir iklim bölgesinde bulunan caminin güney duvarına 5 cm kalınlığında faz değiştirici malzeme (FDM) eklenmiştir. Çalışmada modelleme Revit programı ile yapıldıktan sonra OpenStudio arayüzü kullanılarak model EnergyPlus programına aktarılmıştır. EnergyPlus programında FDM’li ve FDM’siz sıcaklıklar her iklim bölgesi için farklı şekilde yıl içerisinde en sıcak beş gün ve en soğuk beş gündeki namaz vakitleri esas alınarak simüle edilmiştir. Simülasyon sonucu FDM malzemesinin ısı depolama ve ısıyı iç mekâna yayma değerleri sayısal bir model ile doğrulanarak CFD analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre FDM malzemesinin tüm iklim bölgelerinde iç mekân sıcaklıklarında denge sağladığı ve enerji tüketimini azalttığı gözlemlenmiştir. Yaz döneminde 1 ve 2. derece gün bölgelerinde daha verimli olan sistemin, kış mevsiminde ise 4 ve 6. derece gün bölgelerinde daha verimli olduğu saptanmıştır. Ayrıca CFD analizleri irdelendiğinde ise ısı yayılımının 1.derece gün bölgesinde daha verimli olduğu görülmektedir. Bu çalışma iç mekân hava sıcaklığı ve enerji verimliliğini iyileştirmek amacıyla FDM malzemesinin duvar yüzeyine entegre bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Özellikle cami gibi ısıl konforun dengesiz olabileceği yapılara yönelik uygulanabilir çözümler sunması açısından önemlidir.

Evaluation of type mosque projects in Turkey in terms of indoor air temperature and energy consumption according to degree day zones: Suggestions for improvement using phase change materials

H I G H L I G H T S

- Improvement of indoor air temperature in six different degree day zones
- Use of phase change materials in building shell
- Comparison of energy consumption in mosque buildings

Article Info

Research Article

Received: 12.12.2024

Accepted: 13.04.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1600452

Keywords:

Indoor air temperature,
mosque buildings,
climate zones,
phase change material,
EnergyPlus Software

ABSTRACT

In this study, indoor temperature and energy consumption analyses of mosques located in six different climate zones in Turkey were carried out. In the study, 5 cm thick phase change material (PCMs) was added to the south wall of the mosque in each climate zone. In the study, modelling was done with Revit software and then the model was transferred to EnergyPlus software using OpenStudio interface. The EnergyPlus program simulated temperatures with and without PCMs for each climate zone differently, taking into account the prayer times on the five hottest and five coldest days of the year. As a result of the simulation, the heat storage and dissipation values of the PCMs material were verified with a numerical model, and CFD analyses were performed. According to the results obtained, the PCMs material was found to balance indoor temperatures in all climate zones and reduce energy consumption. It was found to be more efficient in the 1st and 2nd degree day zones in the summer season and in the 4th and 6th degree day zones in the winter season. In addition, CFD analysis shows that heat dissipation is more efficient in the 1st-degree day zone. This study shows that FDM material can be integrated into the wall surface to improve indoor air temperature and energy efficiency. It is particularly important in terms of providing applicable solutions for buildings such as mosques, where thermal comfort can be unstable.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / *Corresponding Author/Authors: *cyetis@beu.edu.tr / Tel: +90 538 717 7107

1. Giriş (Introduction)

Küresel Bina Emisyonları veri tabanına göre bina sektörü, küresel karbon emisyonlarının %37'sini oluşturmaktadır [1]. 2016 yılı verilerine göre yapılar, dünyadaki enerji tüketiminin %19'unu, Türkiye'deki enerji tüketiminin ise %24,80'ini oluşturmaktadır [2, 3]. Bu verilere dayanarak yapıların enerji tüketimi içerisinde büyük pay sahibi olduğunu söylemek mümkündür. Camiler, mimari tasarımları, kültürel, sosyal ve dini niteliklerine bağlı olarak enerji tüketimi açısından diğer yapılar içerisinde farklılaşmaktadır. Müslümanların içinde cuma ve vakit namazlarını kıldıkları ibadet alanları olarak tanımlanan bu yapılarda, namaz vakitleri güneşin konumuna bağlı olarak gün içerisinde belirli periyotlarda (sabah, öğle, ikindi, akşam, yatsı) olabilmektedir. Bu vakitlerin yanı sıra cuma günü öğle vaktinde cuma namazı kılınmaktadır. Namaz vakitlerinin değişiklik göstermesi yapının doluluk oranı ve kullanım miktarını etkilemektedir [4, 5]. Cami mimarisi coğrafik ve kültürel öğelere bağlı olarak belirli kriterlere göre şekillenmektedir. Ancak cami tasarımı ibadet gereksinimlerine bağlı olarak kısıtlayıcı unsurlar bulunmaktadır. Özellikle kible yönünün sabit olması pasif iklimlendirme açısından sınırlayıcı olmaktadır [6, 7]. Türkiye'de kible yönü bölgelere bağlı olarak güney ve güneydoğu doğrultusunda değişmektedir. Ülkenin iklim şartları ele alındığında güney ve doğu yönlerinin pasif iklimlendirme bağlamında önemli olduğu görülmektedir. Cami tasarımı bu yöndeki duvarın yapısal boşluk olmadan inşa edilmesi veya pencere-duvar oranının düşük miktarda olması iç mekân konforunu önemli ölçüde etkilemektedir. Ayrıca kible yönü ile aynı aks doğrultusunda kuzeybatı yönünde giriş kısmının bulunması, bu bölümdaki açıklık miktarının fazla olmasına ve bu kısımdan iç mekâna soğuk hava girişi neden olabilmektedir. Bu etkenlere paralel olarak cami yapılarının harim kısmında kat yüksekliğinin fazla olması da iç mekân konforunun olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır [8, 9]. Bu parametrelere bağlı olarak özellikle soğuk iklim bölgelerinde iç mekân ısı konforunun düşük düzeylerde olduğu açıktır.

Enerji talebinin yoğun olduğu günümüz koşullarında cami yapılarının iklim parametreleri dikkate alınmadan tasarlanması ekonomik ve ekolojik açıdan sorunlar oluşturmaktadır [10]. Son yıllarda küreselleşme, yapı malzemelerinin seri üretimi ve yapı malzemesine ulaşımın kolaylaşması ile birlikte iklimden bağımsız benzer mimari cami formları ortaya çıkmaktadır [8]. Türkiye'de Diyanet İşleri Bakanlığı tarafından tip cami projeleri üretilerek farklı iklim koşullarında uygulanmaktadır. Bu projelerde malzeme, yapı formu, plan geometrisi, kat yüksekliği ve pencere-duvar oranı değerleri aynı düzeyde olmaktadır. Bu benzerliklerin yanında mimari olarak tek farklılığın yapının uygulandığı iklim bölgesine ait U değerlerinin değişkenlik göstermesidir. İç iklimsel konfor dikkate alınmadan farklı iklim koşullarında uygulanan aynı projelerin, sürdürülebilirlik ilkeleri ile çeliştiği görülmektedir. Cami mimarisindeki kısıtlayıcı öğeler, yapının kullanım sıklığı ve doluluk miktarı ile tip projeler birlikte ele alındığında, camilerin iç iklimsel konforunda ciddi problemler olduğu açıktır. Bu nedenle cami yapılarında ısı konforunun iyileştirilmesi oldukça önemlidir [11-14]. Camilerde ısı konforuna yönelik olarak literatürde, yapı strüktür elemanlarını kullanarak iyileştirme [4, 9, 15], aktif havalandırma yöntemlerini kullanarak iyileştirme [16, 17], farklı iklimlerde bulunan yapılarda ısı konforunun takibi, [18-21] ve anket çalışmaları [22], [23] ana başlıklarında çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmaların sıcak iklim koşullarında iç mekân soğutmasına yoğunlaştığı görülmektedir. Soğuk iklim bölgelerinde ısıtmaya yönelik çalışmaların sınırlı düzeyde olduğu literatür taramalarında saptanmaktadır. Pasif ısıtma sistemlerinin zorluğu, bu konudaki çalışmaları sınırlamaktadır. Literatür çalışmaları ve ankete dayalı çalışmalar incelendiğinde soğuk iklim bölgelerindeki camilerde ısı memnuniyetsizliğinin daha yüksek oranda olduğu görülmektedir. Bu nedenle oluşturulan sistemlerin ısıtma ve soğutma sistemlerini bir arada ele alması önem arz etmektedir.

Faz değiştirici malzemeler (FDM), belirli koşullarda ısı enerjisini depolama ve salma özellikleri gösterdiklerinden dolayı özellikle son yıllarda önemli bir çalışma alanı olarak görülmektedir [24, 25]. Sıcaklık değişimlerine bağlı olarak katı ve sıvı fazlar arasında dönüşüm gerçekleştiren bu malzemeler, yapılardaki ısıtma ve soğutma yüklerinin azaltılmasında büyük rol oynamaktadır [26, 27]. Sıcaklık miktarının artması ile FDM'ler katı halden sıvı hale geçiş yapmaktadır. Bu reaksiyon endotermik bir süreç olduğundan dolayı FDM'lerin ısıyı emdiği bilinmektedir. Sıcaklık düştüğünde ise sıvı halden katı hale geçiş yapan FDM'ler ekzotermik bir reaksiyonla ısıyı salmaktadır. Bu reaksiyonlar zinciri FDM'nin çalışma prensibi olarak görülmektedir [28]. Ancak bu sistemin etkin bir şekilde tasarımı optimum verimlilik açısından önem arz etmektedir [29]. FDM'nin yapı kabuğu içerisindeki konumu ve yapının bulunduğu iklim koşulları verimliliği etkileyen temel faktörlerdir. Literatür taramalarında FDM'nin iç mekân ısı konforuna etkisini araştıran çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalar, FDM'nin yapısal elemanlar içerisine entegre edilmesi [30-33], ve FDM'nin duvar [34-37], duvar yüzeyi [38-40], çatı [41, 42] veya zemin [43], [42] yüzey malzemesi olarak kullanımı içermektedir. İncelenen çalışmalarda yapı yönü, FDM'in konumu, iç ve dış ortam koşullarının etkin olduğu saptanmaktadır [44, 45]. Özellikle duvar yüzeyinde kurgulanan FDM'in ısıtma ve soğutma yüküne olumlu katkı yaptığı görülmektedir. Ayrıca bu çalışmaların çoğunluğunda tek bir iklim esas alınarak soğutma veya ısıtma yüklerinin irdelendiği, çok az sayıda çalışmanın ise iki farklı iklim bölgesi için tasarlandığı saptanmaktadır. Yapılan çalışmaların yine büyük çoğunluğunun yapısal ölçekte olmayıp modüler ölçekte olan çalışmalardan oluştuğu tespit edilmiştir. Bu durum literatürde yapısal ölçekte ve farklı iklimlerde yapılacak çalışmalar açısından eksiklik olarak görülmektedir.

Bu çalışma, Türkiye'de 1, 2, 3, 4, 5 ve 6.derece gün bölgelerinde yapılan aynı tip cami projelerindeki iç mekân hava sıcaklığı durumlarını karşılaştırmalı olarak sunarak FDM odaklı bir iyileştirme önerisi sunmaktadır. Yön kısıtlamasından kaynaklı oluşan konforsuzluk durumu güney cephesine FDM eklenerek iç mekânda sıcaklığın iyileştirilmesi ana hedef olarak görülmektedir. Bu çalışma, literatürde FDM malzemelerinin cami yapılarında ilk defa kullanımını içermesi ve Türkiye'de bulunan tüm iklim bölgelerini kapsamaya ile özgün değerini ortaya koymaktadır. Ayrıca farklı iklim bölgelerinde yıllık güneşlenme potansiyeline bağlı olarak FDM malzemelerinin iklime duyarlı tasarlanması özgünlük değeri açısından kıymetlidir.

2. Materyal ve Metot (Material and Methods)

2.1. Tip Cami Projeleri (Type Mosque Projects)

Tip projelendirme sanayileşme ile ortaya çıkan ekonomik sonuçlar neticesinde benzer ihtiyaçlara yönelik projelerin farklı koşullarda uygulaması esasında şekillenmektedir. Türkiye'de özellikle kamu yapılarında tipleşme olduğu görülmektedir. Kamu yapıları içerisinde yaygın olarak inşa edilen yapı tiplerinden biri de camilerdir. Diyanet İşleri Başkanlığı tarafından üst örtü sistemine göre; kubbeli ve çatılı, kişi sayısına göre ise 200-15000 arasında değişen miktarda tip cami projeleri bulunmaktadır. Bu çalışmada 420 kişilik tip cami projesi esas alınmıştır (Tablo 1).

Tip cami projesi, kare planlı, tek kubbeli bir harim alanından oluşmaktadır. Harim alanının kuzeybatı yönünde harim alanıyla aynı ölçülerde üç kubbeli bir örtü sistemiyle tanımlanan son cemaat yerinden oluşmaktadır. Kuzeybatı yönünden ana girişi sağlanan yapıda, aynı eksen üzerinde mihrap nişi bulunmaktadır. Yapının kuzeydoğu ve güneybatı cephelerinde aynı özelliklere sahip 3 adet pencere, güneydoğu cephesinde ise 2 adet pencere bulunmaktadır (Şekil 1. a, b). Yapıya ait 3 boyutlu görsel Şekil 1.c'de verilmiştir.

2.2. İklim Verileri (Climate Data)

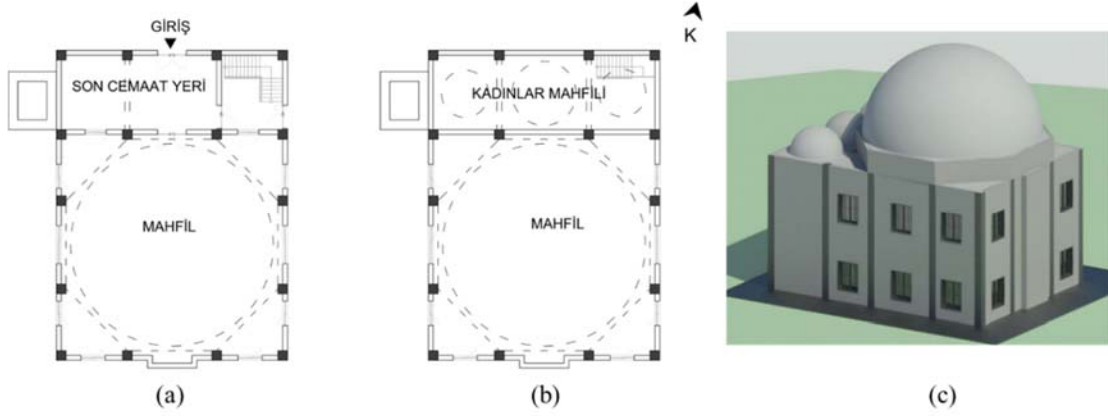
İklim, pasif tasarım ilkelerine bağlı olarak değerlendirilmesi gereken bir parametredir. Enerji etkin yapı tasarım ilkelerinden bağımsız olarak iklim değerlendirmesinin yapılması, yeterli düzeyde olmamaktadır. Bu nedenle enerji etkin yapı tasarım ilkeleri değerlendirildikten sonra iklim parametreleri açıklanmıştır. Enerji etkin yapı tasarımında bulunan en önemli kriterler coğrafi özellikler (konum ve iklim) ve yapı özellikleri (yapı formu, yönlenme ve yapı kabuğu) olarak görülmektedir. Tip proje ele alındığı için yapı özelliklerinin sabit olduğu bilinmektedir. Bu nedenle coğrafi ve iklimsel özellikler belirleyici niteliktedir. İklim ve konuma bağlı olarak değişen sıcaklık ve hâkim rüzgâr yönü parametrelerine ait veriler bu başlık altında açıklanmıştır. İklim bölgeleri, ısıtma ve

soğutma sistemlerine göre şekillenen derece gün bölgeleridir. TS 825 (2024)'e göre Türkiye'de 6 farklı derece gün (DG) bölgesi belirlenmiştir [46]. Belirlenen iklim bölgelerinde duvar, tavan, döşeme ve pencere U değerleri iklime bağlı olarak değişmektedir (Tablo 2).

Araştırma kapsamında 6 farklı iklim bölgesinden illerin enlem derecesi ve güneşlenme potansiyelleri göz önüne alınarak Mersin (1), Gaziantep (2), Sakarya (3), Kayseri (4), Gümüşhane (5) ve Ağrı (6) şehirleri çalışma alanı olarak seçilmiştir (Şekil 2). Bu kentlere ait yıllık sıcaklık değişimleri Şekil 3'de verilmiştir. Şekil 3 incelendiğinde 1 ve 2. derece gün bölgelerinin sıcak iklimler olduğu görülmektedir.

Tablo 1. Yapıya ait bilgiler (Building information)

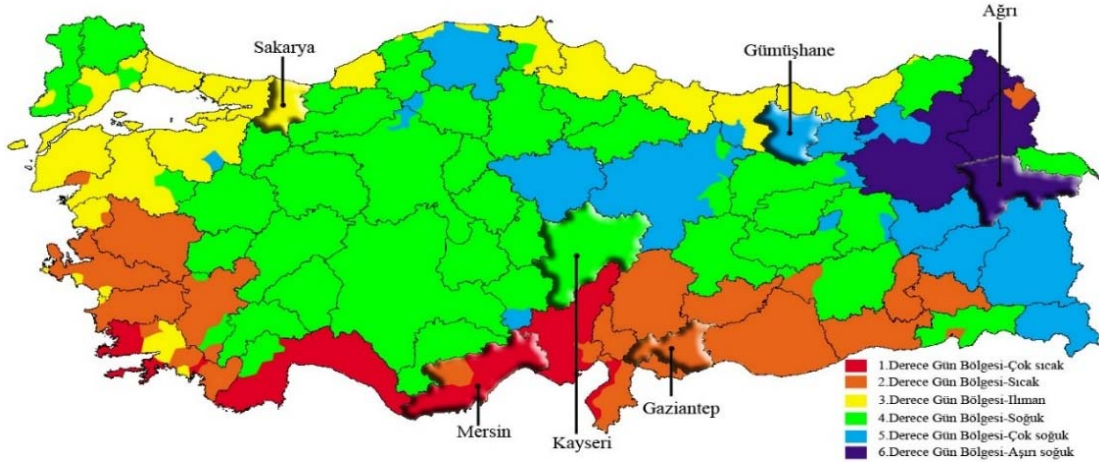
Cemaat kapasitesi	Harim alanı	Son cemaat yeri	Bina dış ölçüleri	Toplam inşaat alanı
420 kişi	200 m ²	30 m ²	16.1m*12 m	300 m ²



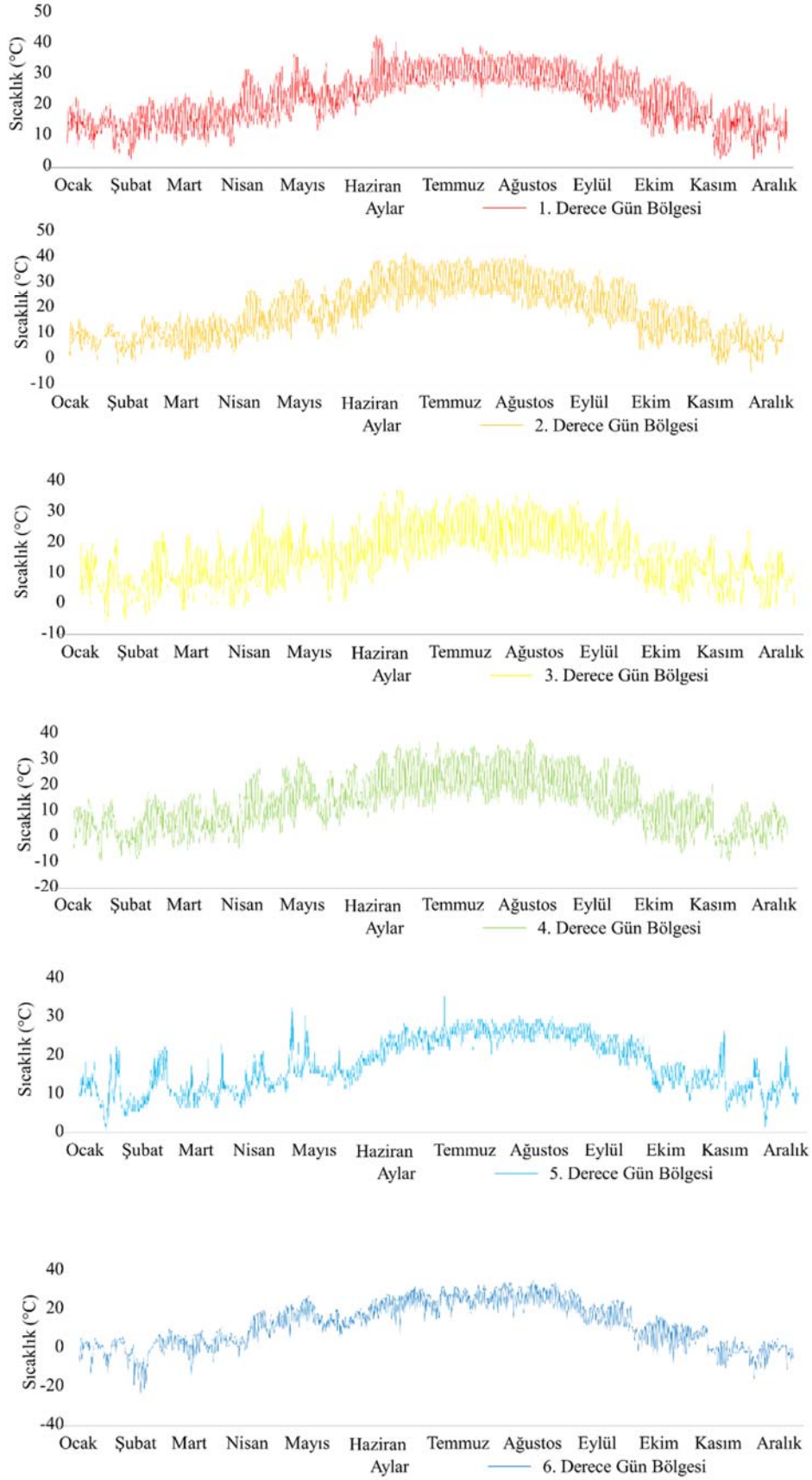
Şekil 1. a) Tip cami zemin kat planı (Type mosque ground floor plan), b) Tip cami 1. kat planı (Type mosque 1st floor plan), c) Caminin 3 boyutlu görünümü (3D view of the mosque)

Tablo 2. İklim bölgelerindeki yapılara ait U değerleri (U-values of buildings in climate zones) [46]

TS 825 Derece Gün Bölgesi	Duvar [W/(m ² .K)]	Çatı [W/(m ² .K)]	Zemin [W/(m ² .K)]	Pencere [W/(m ² .K)]
1	0.45	0.35	0.4	1.8
2	0.4	0.3	0.35	1.8
3	0.4	0.3	0.35	1.8
4	0.35	0.25	0.3	1.8
5	0.25	0.2	0.25	1.8
6	0.25	0.2	0.25	1.8



Şekil 2. İklim bölgelerindeki çalışma alanları (Working areas in climate zones) [46]



Şekil 3. Çalışma alanı olarak seçilen illerdeki yıllık sıcaklık verileri (Annual temperature data in the provinces selected as the study area) [47]

Bu bölgelerde hava sıcaklığı, yaz mevsiminde ortalama 40°C'ye ulaşabilirken, kış mevsiminde ise ortalama -3°C'ye kadar düşebilmektedir. TS 825'e göre sırasıyla ılıman ve soğuk olarak nitelendirilen 3 ve 4. derece gün bölgelerinde ise hava sıcaklığının yaz mevsiminde 37°C'ye kadar çıktığı, kış mevsiminde ise -8°C'ye kadar düştüğü görülmektedir. Soğuk iklim olarak belirtilen 5 ve 6. Derece gün bölgelerinde ise hava sıcaklığının yaz mevsiminde 34°C'ye kadar çıkarken, kış mevsiminde ise 5. Derece gün bölgesinde 0°C 6. Derece gün bölgesinde ise -24°C dereceye kadar düşmektedir [47].

İç mekânın pasif iklimlendirmesi üzerinde etkili olan bir diğer parametre, yapının bulunduğu bölgedeki hâkim rüzgâr yönüdür. Hâkim rüzgâr yönüne bağlı olarak oluşturulan tasarımlarla, iç iklimsel konforun belirli düzeylerde tutulması muhtemeldir. Ancak cami yönlenmesinin sabit olması nedeniyle bazı bölgelerde hâkim rüzgâr yönünün verimli olmadığı görülmektedir. Bu yönelmeye bağlı olarak yıl içerisindeki sıcaklık farklarının da değiştiği saptanmaktadır. Çalışma kapsamında ele alınan altı farklı kente ait iklim verileri Tablo 3'de verilmiştir [47].

2.3. Faz Değiştirici Malzeme (FDM) ve Programlar (Phase Change Material (PCMs) and Software)

Çalışma kapsamında caminin güney duvarına yüzey olarak eklenecek parafin bazlı faz değiştirici malzeme kullanılmıştır. Bu yöntemle parafin malzemesinin enerji ve ısı depolama özelliklerinin iç mekânda aktif bir şekilde kullanımı amaçlanmaktadır. Erime aralığı geniş olan parafin, aynı zamanda yüksek ısı depolama kapasitesine de sahiptir. Mevcut özellikleri dikkate alınarak iç mekân sıcaklık dengesini

sağlayarak enerji verimliliğini artırıcı bir faktör olarak tercih sebebi olmuştur. Ayrıca dayanıklı olması ve toksik bir malzeme olmaması da sürdürülebilirlik açısından tercih edilmesine olanak sağlamaktadır. FDM'ler her bir il için güneş yükseklik açıları ve güneş azimut açıları dikkate alınarak güney duvarı boyunca konumlandırılmıştır. Böylece güneş ışınlarından en verimli şekilde yararlanılması hedeflenmiştir. Çalışmada ticari parafin malzemesi kullanılmıştır. Malzemeye ait veriler Tablo 4'de verilmiştir.

Çalışmada Revit, OpenStudio ve EnergyPlus programları kullanılmıştır [49-51]. Model yapımı için Revit programı kullanılmıştır. İç mekân sıcaklık simülasyonları ve enerji simülasyonları için EnergyPlus programı kullanılmıştır. EnergyPlus enerji simülasyonlarında yaygın olarak kullanılan bir yazılımdır. Modelin Revitten EnergyPlus programına aktarımında ara yüz programı olarak da OpenStudio programı kullanılmıştır. Revit programında yapı tüm bileşenleri ile birlikte modellenmiştir. Faz değiştirici malzeme eklenmesi EnergyPlus programında yapılmıştır. Faz değiştirici malzeme EnergyPlus programında histeresis etkilerini içerecek şekilde 'Phase Changing Hysteresis' başlığında tanımlanmıştır. Faz değiştirici eklenen duvarın kesiti Şekil 4'de verilmiştir.

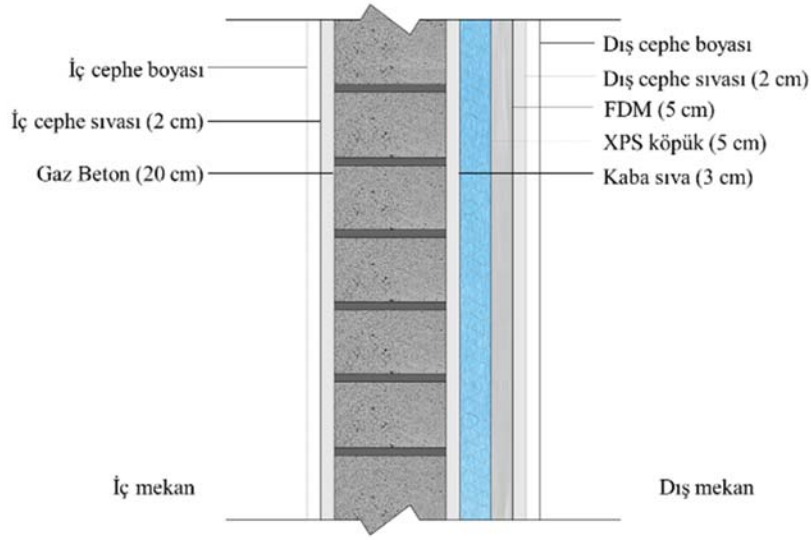
Çalışmadaki simülasyonlar her bir iklim bölgesinin yıl içerisinde en sıcak ve en soğuk 5 günü dikkate alınarak yapılmıştır. (Tablo 5). Belirtilen günler içerisinde yapıdaki beş farklı namaz saati, namaz saatinden yarım saat önce ve yarım saat sonra olmak üzere 1 saatlik zaman diliminde gerçekleştirilmiştir. Bu sayede yapının kullanım aşamasındaki iç mekân sıcaklık takibi amaçlanmıştır.

Tablo 3. İklim bölgelerine ait iklimsel veriler (Climatic data of climate zones) [47]

TS 825 Derece gün bölgesi	Hâkim rüzgâr yönü	Yıl içerisindeki minimum sıcaklık (°C)	Yıl içerisindeki maksimum sıcaklık (°C)	Güneş radyasyon değeri (KWh/m ² -yıl)
1 (Mersin)	Güneybatı-Batı	2	42	1,614
2 (Gaziantep)	Batı	-6	41	1,582
3 (Sakarya)	Kuzey-Kuzeybatı	-7	37	1,342
4 (Kayseri)	Kuzey-Kuzeydoğu	-10	37	1,588
5 (Gümüşhane)	Batı	0	35	1,500
6 (Ağrı)	Kuzeybatı	-24	34	1,570

Tablo 4. Faz değiştirici malzemeye ait özellikler (Properties of the phase change material) [48]

Özellikler	Birim	Değer
Tüm Faz Değişim Süreci Boyunca Gizli Isı	J/kg	175
Sıvı Hal Isıl İletkenlik	W/mK	0.20
Sıvı Hal Yoğunluğu	kg/m ³	800
Sıvı Hal Özgül Isı	J/kgK	2100
Erime Eğrisinde Yüksek Sıcaklık Farkı	Δ °C	3
En Yüksek Erime Sıcaklığı	°C	50
Erime Eğrisinde Düşük Sıcaklık Farkı	Δ °C	3
Katı Hal Isıl İletkenliği	W/mK	0.25
Katı Hal Yoğunluğu	kg/m ³	900
Katı Hal Özgül Isısı	J/kgK	2200
Donma Eğrisinde Yüksek Sıcaklık Farkı	Δ °C	3
Tepe Donma Sıcaklığı	°C	50
Donma Eğrisinde Düşük Sıcaklık Farkı	Δ °C	3



Şekil 4. FDM eklenen duvarın kesiti (Section of PCM added wall)

Tablo 5. İklim bölgelerinde yapılan simülasyon zamanlarına ait veriler (Data for simulation times in climate zones)

TS 825 Derece gün bölgesi	Yıl içerisindeki en soğuk ve en sıcak 5 gün	Kış namaz saatleri	Yaz namaz saatleri
1 (Mersin)	2-6 Şubat 8-12 Ağustos	Sabah-06:14, Öğle-13:02, İkinci-15:51, Akşam-18:15, Yatsı-19:31	Sabah-04:14, Öğle-13:54, İkinci-16:39, Akşam-19:48, Yatsı-21:12
2 (Gaziantep)	3-7 Şubat 3-7 Ağustos	Sabah-06:03, Öğle-12:51, İkinci-15:41, Akşam-18:05, Yatsı-19:21	Sabah-03:56, Öğle-12:44, İkinci-16:30, Akşam-19:43, Yatsı-21:10
3 (Sakarya)	28 Ocak-1 Şubat 7-11 Ağustos	Sabah-06:38, Öğle-13:18, İkinci-15:54, Akşam-18:18, Yatsı-19:40	Sabah-04:13, Öğle-13:11, İkinci-17:02, Akşam-20:14, Yatsı-21:47
4 (Kayseri)	11-15 Şubat 11-15 Ağustos	Sabah-06:04, Öğle-12:59, İkinci-15:52, Akşam-18:18, Yatsı-19:36	Sabah-04:07, Öğle-12:50, İkinci-16:37, Akşam-19:45, Yatsı-21:12
5 (Gümüşhane)	20-24 Ocak 3-7 Ağustos	Sabah-06:05, Öğle-12:40, İkinci-15:11, Akşam-17:33, Yatsı-18:56	Sabah-03:32, Öğle-12:35, İkinci-16:27, Akşam-19:42, Yatsı-21:16
6 (Ağrı)	4-8 Şubat 6-10 Ağustos	Sabah-05:41, Öğle-12:29, İkinci-15:13, Akşam-17:38, Yatsı-18:58	Sabah-03:26, Öğle-12:21, İkinci-16:10, Akşam-19:22, Yatsı-20:53

2.4. Sayısal Modelleme (Numerical Modelling)

Çalışma kapsamında PCM malzemesinin sayısal modellemesi literatür çalışmalarına dayanmaktadır. Literatür çalışmalarında kullanılan yöntemler çalışmanın amacına bağlı olarak optimize edilmiştir. Sayısal modelleme duvar yapısına ilişkin parametreler ile iç ve dış çevre koşulları hesaba alınarak sonuca gidilmiştir. Sayısal modellemenin ilk aşaması, duvardan ısı geçişine yönelik olarak hesaplamalardır. Bu hesaplamalar Eş. 1-Eş. 6 denklemleri ile hesaplanmaktadır. İkinci aşama duvar strüktürü içerisinde, başlangıç sıcaklıklarına bağlı olarak FDM tarafından emilen ısı miktarını hesaplayan ve Eşitlik 7-Eş. 9 arasını kapsayan süreçtir. Üçüncü aşama FDM'nin duyulur (Eş. 10) ve gizli ısı (Eş. 11-12) hesaplamalarını içermektedir. Son aşama ise bu işlemlere bağlı olarak iç mekân ısı akışını hesaplayan denklemdir (Eş. 13). Bu denklemler MATLAB programı ile çözümlenerek iç mekân sıcaklık değerleri saptanmıştır.

Belirlenen parametreler ve bu parametrelerin etkilerine yönelik olarak ısı denge denklemi Eş. 1'deki gibidir.

$$Q_{ab} = Q_{ir} + Q_{cv} + Q_{cd} \quad (1)$$

Eş. 1'de verilen unsurlara ait hesaplama denklemleri Eş. 2-Eş. 5'deki gibidir.

$$Q_{ab} = \beta I_s \quad (2)$$

$$Q_{ir} = h_r(T_0 - T_r) \quad (3)$$

$$h_r = \sigma \epsilon (T_0^2 + T_r^2)(T_0 + T_r) \quad (4)$$

$$Q_{cv} = h_{cv}(T_0 - T_{hava}) \quad (5)$$

Bu formüllere dayanarak FDM katmanına aktarılan ısı Eş. 6 ile hesaplanır.

$$Q_{cd} = \beta I_s - h_r(T_0 - T_r) - h_{cv}(T_0 - T_{hava}) = (h_r + h_{cv}) \left[\frac{\beta I_s + h_r T_r h_{cv} T_{hava}}{h_r + h_{cv}} \right] - T_0 \quad (6)$$

$$Q_{cd} = Q_r + Q_{fdm} + Q_{in} \quad (7)$$

$$Q_r = c_r m (T_r - T_r') \quad (8)$$

$$Q_{in} = Q_{cd} - Q_r - Q_{fdm} \quad (9)$$

Faz değiştirici malzemenin duyulur ısı miktarı Eş. 10 ile hesaplanmaktadır.

$$H_s = c_s m (T_{fdm} - T'_{fdm}) \quad (10)$$

Faz değiştirici malzemenin gizli ısını hesaplamak için Eş. 11, tüm bu denklemlerin ışığında iç mekâna akan ısı miktarı ise Eş. 13 ile hesaplanmaktadır [52].

$$H_L = fL \quad (11)$$

$$Q_{in} = c_s m (T_m - T'_{fdm}) + fL \quad (12)$$

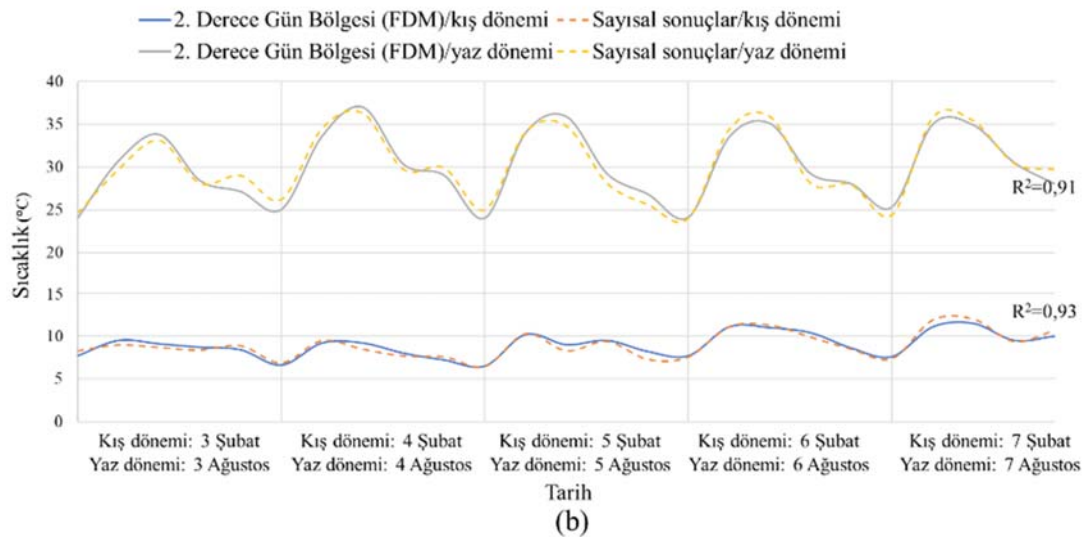
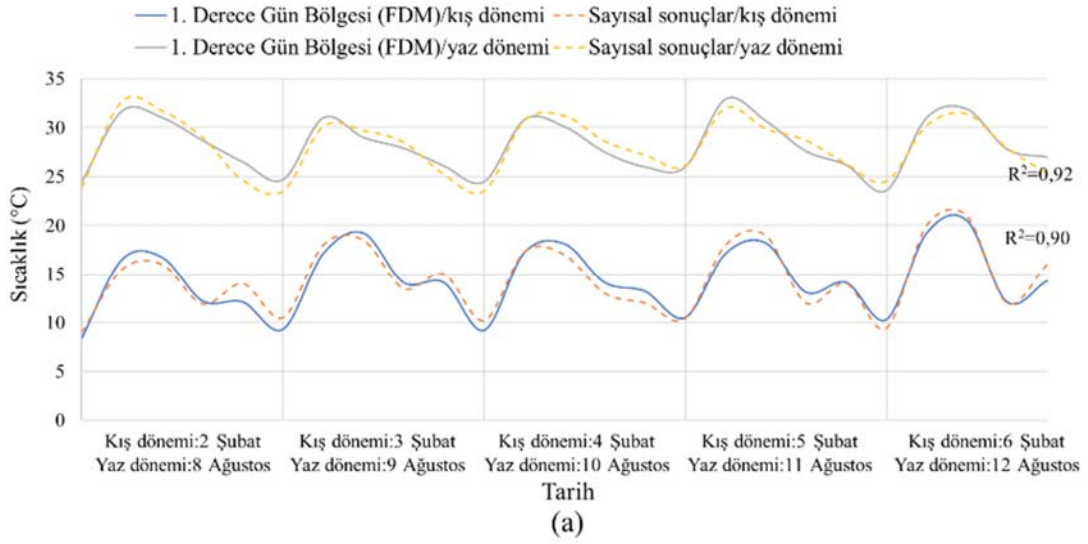
$$Q_{in} = \begin{cases} h_z (T_z - T_0) - c_r m (T_r - T'_r) - c_s m (T_{fdm} - T'_{fdm}), & f=0 \\ h_z (T_z - T_0) - c_r m (T_r - T'_r) - c_s m (T_{fdm} - T'_{fdm}) - fL, & 0 < f \leq 1 \end{cases} \quad (13)$$

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Bu bölümde faz değiştirici malzemenin özellikleri sayısal modelleme ile doğrulanmıştır. Ayrıca farklı iklim bölgelerinde bulunan yapılara eklenen faz değiştirici malzemelerin iç mekân sıcaklık değerlerine ve enerji tüketimine yönelik sonuçları literatür ile bağlantılı olarak tartışılmaktadır.

3.1. Sayısal Model Sonuçları (Numerical Model Results)

EnergyPlus programında yapılan simülasyonlar, her bir iklim bölgesinin yıl içerisinde en sıcak ve en soğuk beş günü dikkate alınarak beş farklı namaz saati, namaz saatinden yarım saat önce ve yarım saat sonra olmak üzere 1 saatlik zaman diliminde gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sonucunda her bir saat için elde edilen ısı farkları sayısal modelleme ile doğrulanmıştır. Sayısal denklemler MATLAB programı ile çözümlenmiştir. Elde edilen



Şekil 5. a) 1.derece gün bölgesindeki sıcaklık değerlerinin doğrulanması (Verification of temperature values in the 1st degree day zone), b) 2.derece gün bölgesindeki sıcaklık değerlerinin doğrulanması (Verification of temperature values in the 2nd degree day zone)

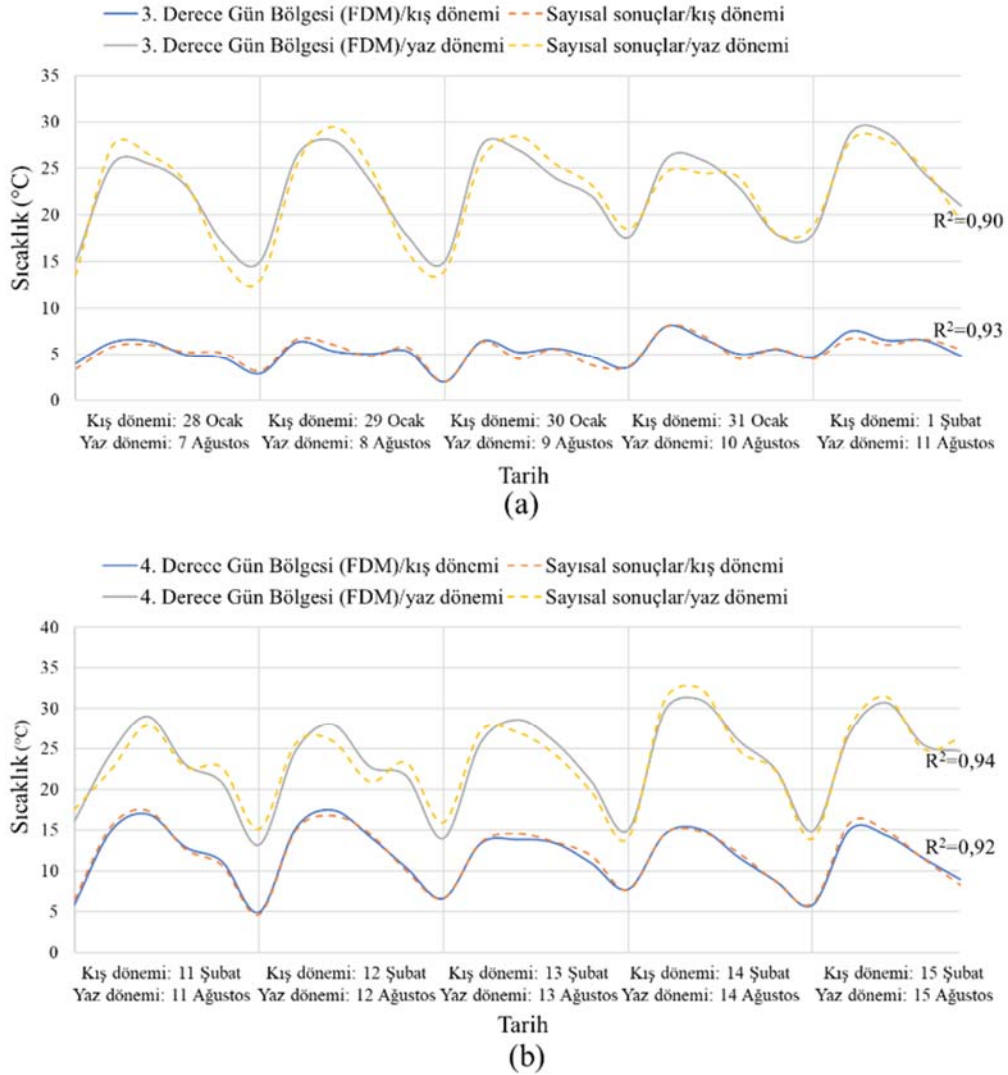
verilere göre 6 farklı derece gün bölgesine ait simülasyon sonuçları ile sayısal denklemlerin sonucu Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir.

3.2. Simülasyon Sonuçları (Simulation Results)

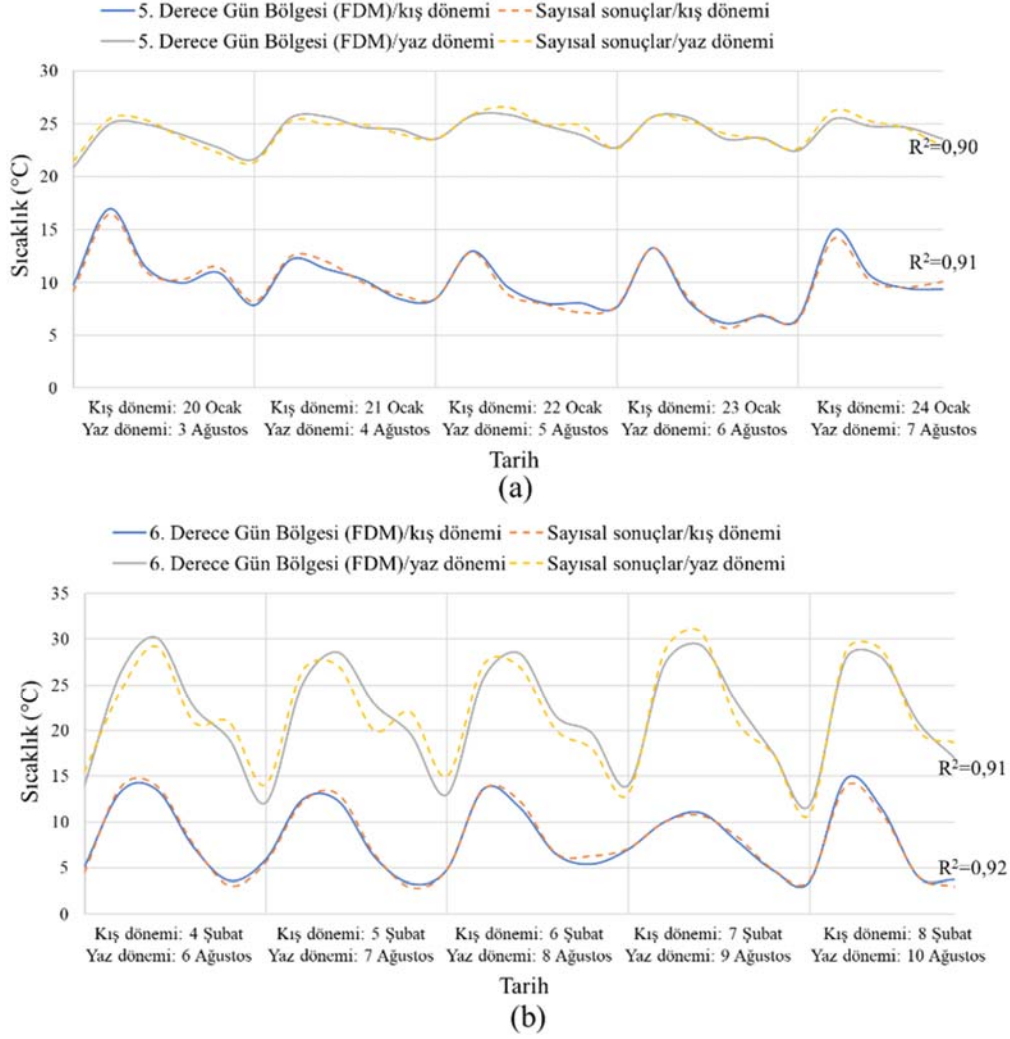
İklim bölgelerine dair verileri daha nitelikli bir şekilde analiz edebilmek amacıyla yıl içerisindeki en soğuk dönem ve en sıcak dönemdeki veriler simülasyonlar ile doğrulanmıştır. Veriler analiz edildiğinde Türkiye için yıl içerisindeki en soğuk dönemin 15 Ocak-15 Şubat, en sıcak dönemin ise 15 Temmuz-15 Ağustos aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle öncelikli olarak belirtilen dönemlerde iklim bölgelerindeki yaz ve kış dönemi sıcaklıkları karşılaştırılmıştır. Kış mevsimi için yapılan analizlerde 1.derece gün bölgesinde iç mekân hava sıcaklığının ortalama 12 °C ile en yüksek değerlerde, 6. derece gün bölgesinde ise iç mekân hava sıcaklığının ortalama -2,5 °C ile en düşük değerde olduğu görülmektedir (Şekil 8).

Yıl içerisinde yaz mevsimi için yapılan değerlendirmelerde sıcaklıkların daha stabil olduğu görülmektedir. 2. derece gün bölgesinin ortalama 31,4 °C ile en sıcak bölge olduğu, 6.derece gün bölgesinin ortalama 25,9 °C ile en soğuk bölge olduğu görülmektedir (Şekil 9).

1.derece gün bölgesinde en soğuk ve en sıcak beş günde, vakit namazları boyunca yapılan simülasyonlar sonucunda, tip projelerde belirtilen duvar sistemi ile faz değiştirici malzeme kullanılan duvar sisteminin iç mekân hava sıcaklığı ve enerji tüketimine etkisi irdelenmiştir. 1.derece gün bölgesinde faz değiştirici malzeme kullanımının yaz mevsiminde daha etkin olduğu ve iç mekândaki sıcaklıkları ortalama 2,1-3,4 °C düşürdüğü görülmektedir. Ayrıca sıcaklıktaki azalma etkisinin en dinamik hissedildiği saatlerin öğle ve ikindi namaz vakitlerinde olduğu tespit edilmiştir. Kış mevsiminde yapılan analizlerde faz değiştirici malzeme etkisinin yaz mevsimine göre daha az miktarda olduğu görülmektedir. Bu mevsimde iç mekândaki sıcaklıkların ortalama 1-1,4 °C artış gösterdiği ve bu artışların sabah ile yatsı namazı saatinde yoğunlaştığı saptanmıştır (Şekil 10). 2.derece gün bölgesinde yapılan simülasyonlarda faz değiştirici malzeme kullanılan duvar sisteminde iç mekândaki sıcaklıkların yaz döneminde azalış, kış döneminde ise artış gösterdiği tespit edilmiştir. İç mekânda yaz döneminde ortalama 2,5-3,5 °C azalış gösteren sıcaklıklar, kış döneminde ortalama 1,1-1,7 °C artış gösterdiği görülmektedir. Yaz dönemindeki sıcaklık azalmaları en belirgin olarak öğle ve ikindi vakitlerinde, kış mevsimindeki sıcaklık artışları ise en belirgin olarak öğle ve yatsı vakitlerindedir (Şekil 11).



Şekil 6. a) 3.derece gün bölgesindeki sıcaklık değerlerinin doğrulanması (Verification of temperature values in the 3rd degree day zone), b) 4.derece gün bölgesindeki sıcaklık değerlerinin doğrulanması (Verification of temperature values in the 4th degree day zone)



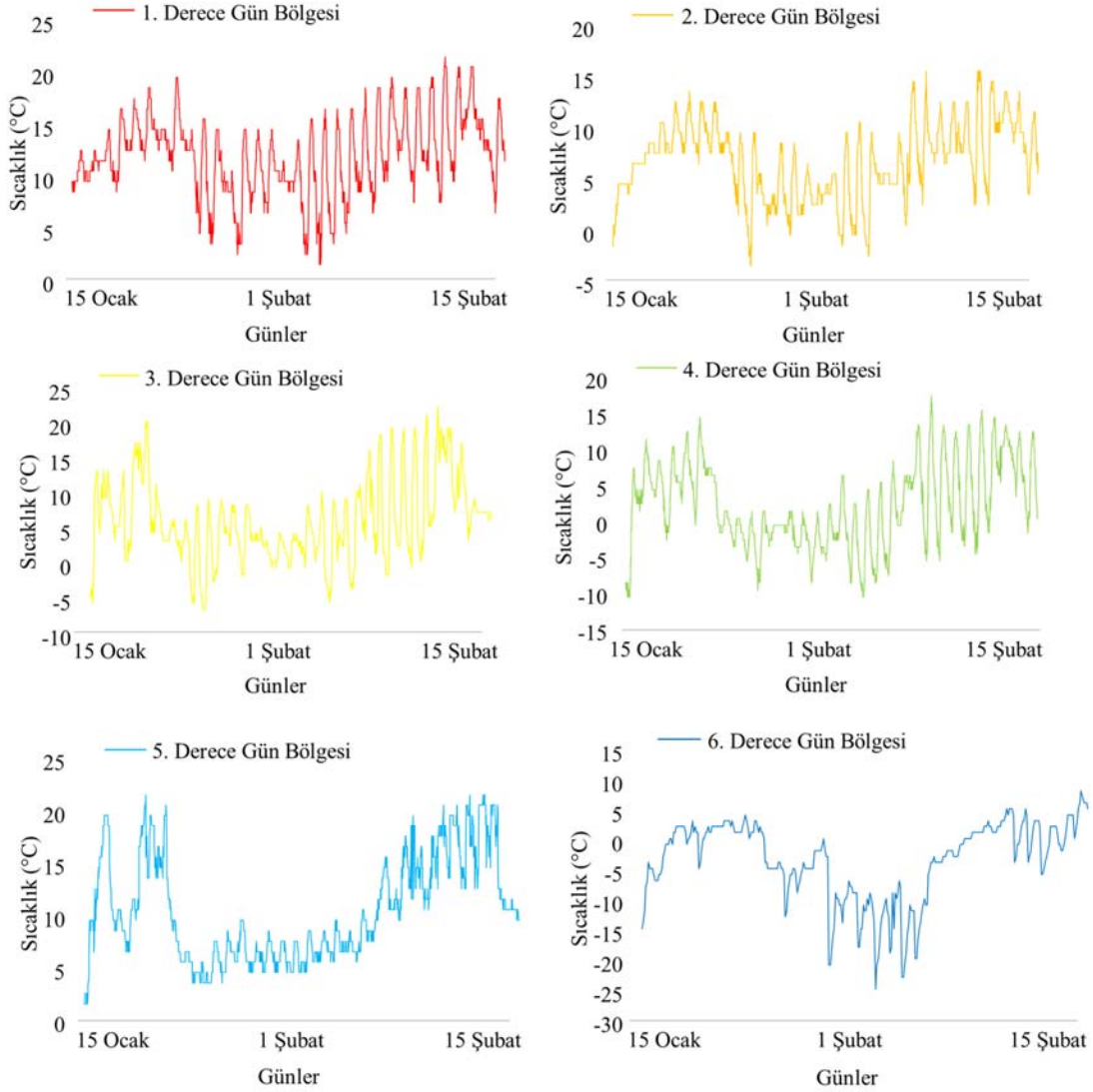
Şekil 7. a) 5.derece gün bölgesindeki sıcaklık değerlerinin doğrulanması (Verification of temperature values in the 5th degree day zone), b) 6.derece gün bölgesindeki sıcaklık değerlerinin doğrulanması (Verification of temperature values in the 6th degree day zone)

3 ve 4.derece gün bölgelerinde yapılan simülasyonlarda 1 ve 2.derece gün bölgelerine benzer olarak faz değiştirici malzeme etkisinin yaz döneminde daha belirgin olduğu görülmektedir. Ancak bu benzerliğin aksine kış mevsimi için 1 ve 2.derece gün bölgelerinden daha pozitif sonuçlar elde edilmiştir. 3.derece gün bölgesinde yaz döneminde ortalama sıcaklık azalma miktarının 1,8-2,7 °C, 4.derece gün bölgesinde ise bu azalış miktarının 1,8-2,5 °C aralığında olduğu tespit edilmiştir. Kış döneminde ise iç mekândaki sıcaklık artışının 3.derece gün bölgesinde 1,2-2 °C, 4.derece gün bölgesinde ise bu artışın 1,8-3 °C aralığında olduğu saptanmaktadır. Kış mevsimindeki sıcaklık artışları her iki iklim bölgesinde de sabah ve yatsı vakitlerinde belirginleşmektedir. (Şekil 12-13).

5. ve 6. derece gün bölgelerinde FDM malzemesinin kış mevsiminde daha etkin sonuçlar verdiği saptanmaktadır. Bu bölgelerde yaz mevsiminde ortalama sıcaklık azalma miktarının 5. Derece gün bölgesinde 2-2,5 °C aralığında, 6. derece gün bölgesinde ise 1,9-2,8 °C aralığında değişmektedir. Yaz mevsimindeki sıcaklık azalmalarındaki en belirgin düşüşün öğle, ikindi ve akşam namazı vakitlerinde olduğu görülmektedir. Kış mevsiminde ise ortalama sıcaklık artış miktarının 5. derece gün bölgesinde 1,8-2,9 °C aralığında, 6. derece gün bölgesinde ise 2,2-3,1 °C aralığında değiştiği

ve bu sıcaklık artışlarının her iki iklim bölgesinde de sabah ve yatsı vakitlerinde belirginleştiği söylenebilmektedir. (Şekil 14-15).

Faz değiştirici malzemenin iç mekândaki ısı dağılımına etkisini araştırmak amacıyla CFD analizleri yapılmıştır. CFD analizleri yaz ve kış dönemi için sıcaklık ortalamaları alınarak sistemde FDM olmadan ve FDM varken analiz edilmiştir. Analizler solunum alanı olarak kabul edilen ve insanların doğrudan etkileşimde bulunduğu 1,5 metre seviyesinden alınmıştır. CFD sonuçlarına göre ısı miktarının caminin merkez kısmında yoğunlaştığı, dış duvara yakın kısımlarının ise mekânın merkezine yakın bölgesine göre 0,6-1,1 °C daha soğuk kaldığı görülmektedir. Bu durum cami yapılarının kat yükseklikleri ve zemin alanının fazla olmasıyla açıklanabilmektedir. Ayrıca orta kısımda bulunan kubbe yapısının da bu sıcaklık dağılımında etkili olduğu söylenebilmektedir. FDM malzemesinin etkisine göre CFD sonuçları incelendiğinde, FDM malzemesinin güney duvarında yüzey sıcaklığını 1-1,2 °C aralığında artırdığı görülmektedir. Kış mevsiminde FDM kullanılan güney duvarının iç mekâna ısı yayılımına etkisinin en fazla olduğu derece gün bölgelerinin 1 ve 2. derece gün bölgesi olduğu tespit edilmiştir. Bu durum 1 ve 2.derece gün bölgelerinde dış ortam ısının diğer bölgelere daha yüksek olması ile FDM malzemesinin daha erken erimesi olarak açıklanabilmektedir (Şekil 16).



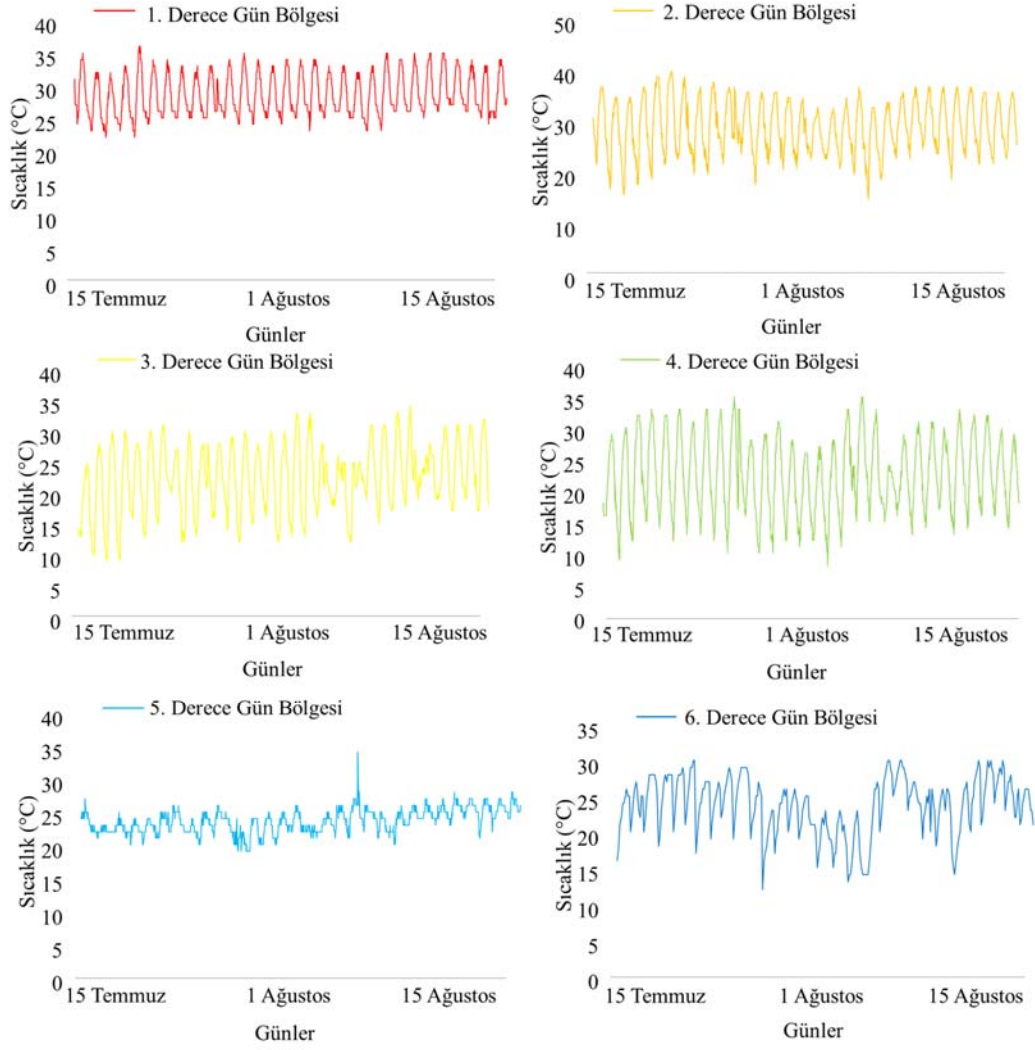
Şekil 8. İklim bölgelerindeki kış dönemi sıcaklık verileri (Winter temperature data in climate zones)

Yaz mevsimi için yapılan CFD analizleri irdelendiğinde bu alanlarda FDM malzemesinin ısı depolama özelliğinin etkisi görülmektedir. Bu bağlamda güney duvarından iç mekânın orta kısmına doğru sıcaklık dağılımlarında azalmalar saptanmaktadır. Kış dönemi CFD sonuçlarına benzer olarak yaz mevsiminde de sıcaklıkların mekânın merkez kısımlarında yoğunlaştığı görülmektedir. CFD sonuçları irdelendiğinde, FDM malzemesinin güney duvarında yüzey sıcaklığını 1,2-1,5 °C aralığında azalttığı görülmektedir. Sıcaklık dağılımlarındaki azalmalar güney duvarı boyunca belirgin bir şekilde hissedilmektedir. Sıcaklık azalmalarının 1, 2 ve 4. derece gün bölgesinde daha yüksek miktarlarda olduğu tespit edilmiştir (Şekil 17).

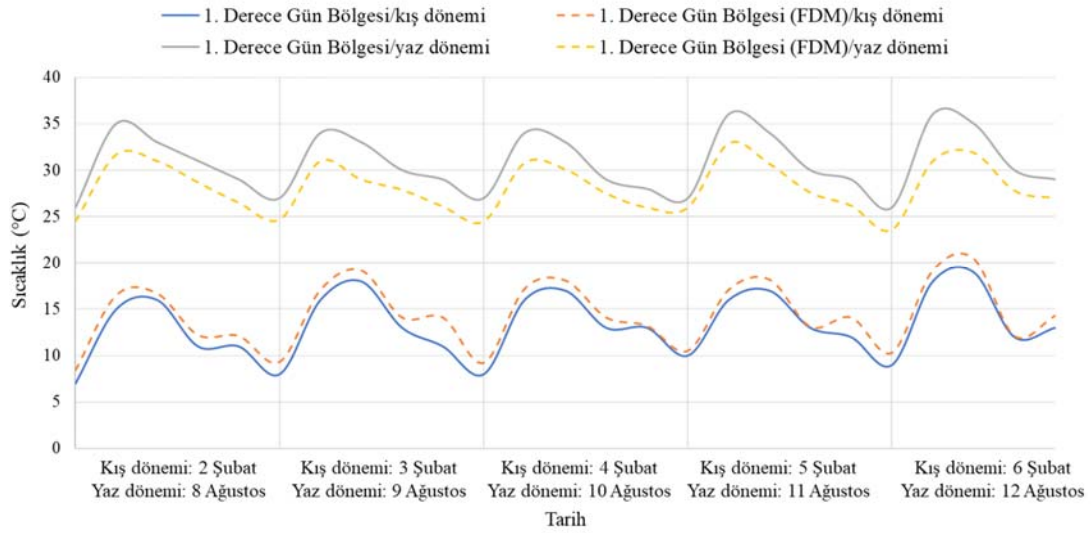
Yapıya yönelik yapılan simülasyonlar sonucunda FDM kullanımının 6 derece gün bölgesinde de ısıtma açısından olumlu katkı yaptığı görülmektedir. Bu sonuçlara bağlı olarak yapılardaki ısıtma ve soğutma yüklerinin takibi, sadece iç mekân hava sıcaklığını iyileştirme çabasının yanında ekonomik olarak da iyileştirmeler sunabilmektedir. EnergyPlus programında yapılan analizler sonucunda tip cami projelerinin ısıtma ve soğutma yükleri hesaplanmıştır. Daha sonra faz değiştirici malzeme eklentisi ile birlikte ısıtma ve soğutma yükleri tekrar hesaplanmıştır.

Yapılan değerlendirmeler sonucunda faz değiştirici malzeme kullanımının 1.derece gün bölgesinde ısıtma yükünü %18,2 oranında, soğutma yükünü ise %5,4 oranında azalttığı tespit edilmiştir. 6.derece gün bölgesinde ısıtma yükünün %9,5, soğutma yükünün ise %7,9 oranında azaldığı, diğer bölgelerde ise ısıtma ve soğutma yükünün sırasıyla 2. derece gün bölgesinde %6,9-%5, 3. derece gün bölgesinde %4,7-%5,5, 4. derece gün bölgesinde %8,2-%9,3, ve 5. derece gün bölgesinde %10,1-% 7,3 oranlarında azaldığı saptanmıştır. Isıtma ve soğutma yüklerine ilişkin veriler grafikte verilmiştir (Şekil 18).

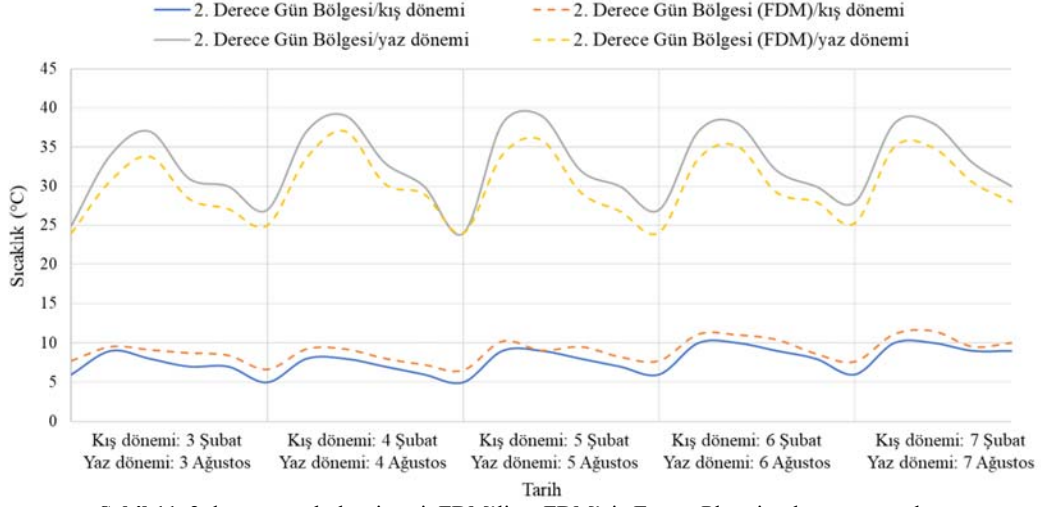
Bu çalışma TS825 (2024) güncel verilerine dayanarak Türkiye’de bulunan altı farklı derece gün bölgesindeki cami yapılarını ele alarak iç mekân hava sıcaklığı ve enerji tüketimi verilerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Faz değiştirici malzemenin olumlu yönlerini ortaya koyabilmek amacıyla altı farklı derece gün bölgesinde benzer nitelikteki cami yapılarının değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda iç mekân hava sıcaklığı ile yıllık ısıtma ve soğutma yükleri simüle edilerek sayısal bir yöntemle de bu simülasyonlar doğrulanmıştır. Ayrıca iç mekân hava sıcaklığındaki değişimin takibinin yanı sıra iç mekân hava sıcaklık dağılımları da önemli olduğundan CFD analizleri ile sonuçlar desteklenmiştir.



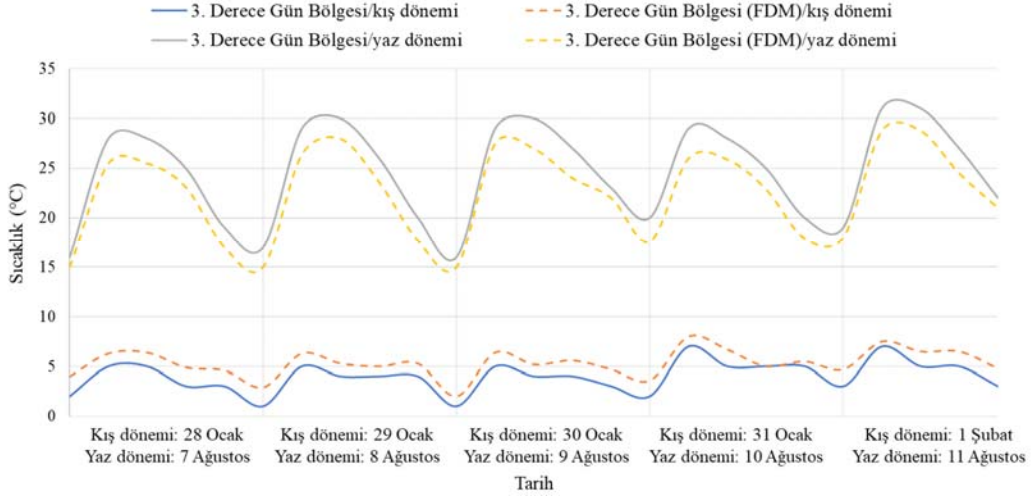
Şekil 9. İklim bölgelerindeki yaz dönemi sıcaklık verileri (Summer temperature data in climate zones)



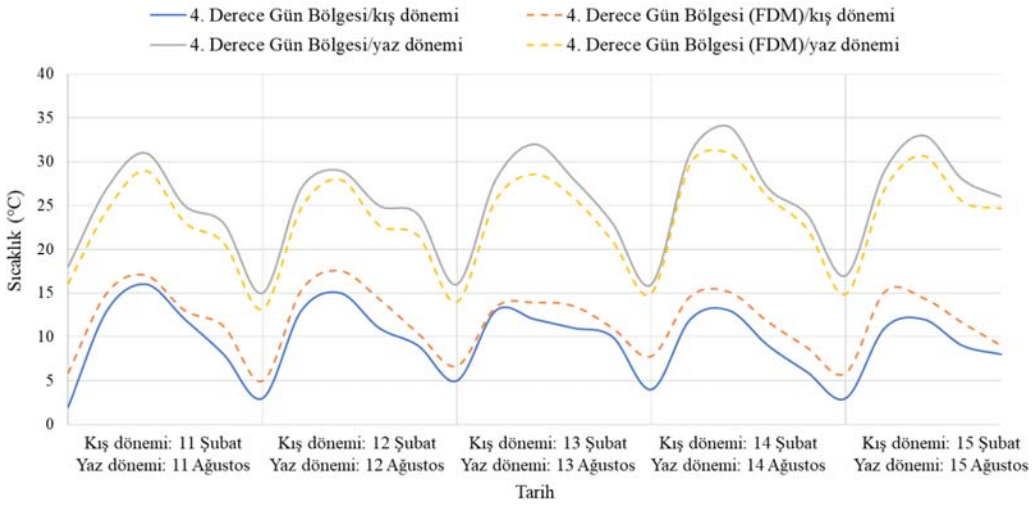
Şekil 10. 1.derece gün bölgesine ait FDM'li ve FDM'siz EnergyPlus simülasyon sonuçları
(1st degree day zone EnergyPlus simulation results with FDM and without FDM)



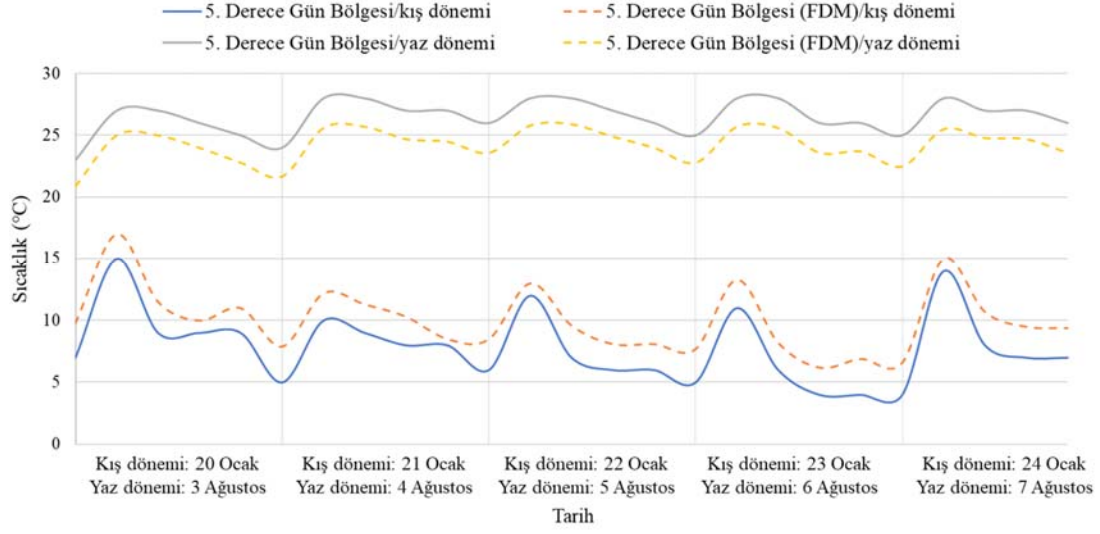
Şekil 11. 2.derece gün bölgesine ait FDM'li ve FDM'siz EnergyPlus simülasyon sonuçları
(2nd degree day zone EnergyPlus simulation results with FDM and without FDM)



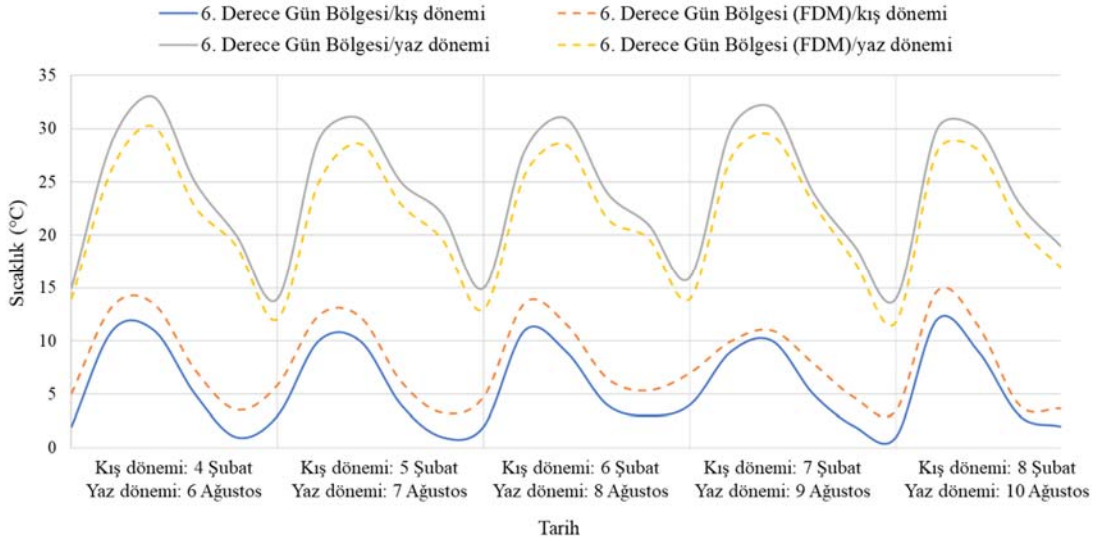
Şekil 12. 3.derece gün bölgesine ait FDM'li ve FDM'siz EnergyPlus simülasyon sonuçları
(3rd degree day zone EnergyPlus simulation results with FDM and without FDM)



Şekil 13. 4.derece gün bölgesine ait FDM'li ve FDM'siz EnergyPlus simülasyon sonuçları
(4th degree day zone EnergyPlus simulation results with FDM and without FDM)



Şekil 14. 5.derece gün bölgesine ait FDM'li ve FDM'siz EnergyPlus simülasyon sonuçları
(5th degree day zone EnergyPlus simulation results with FDM and without FDM)

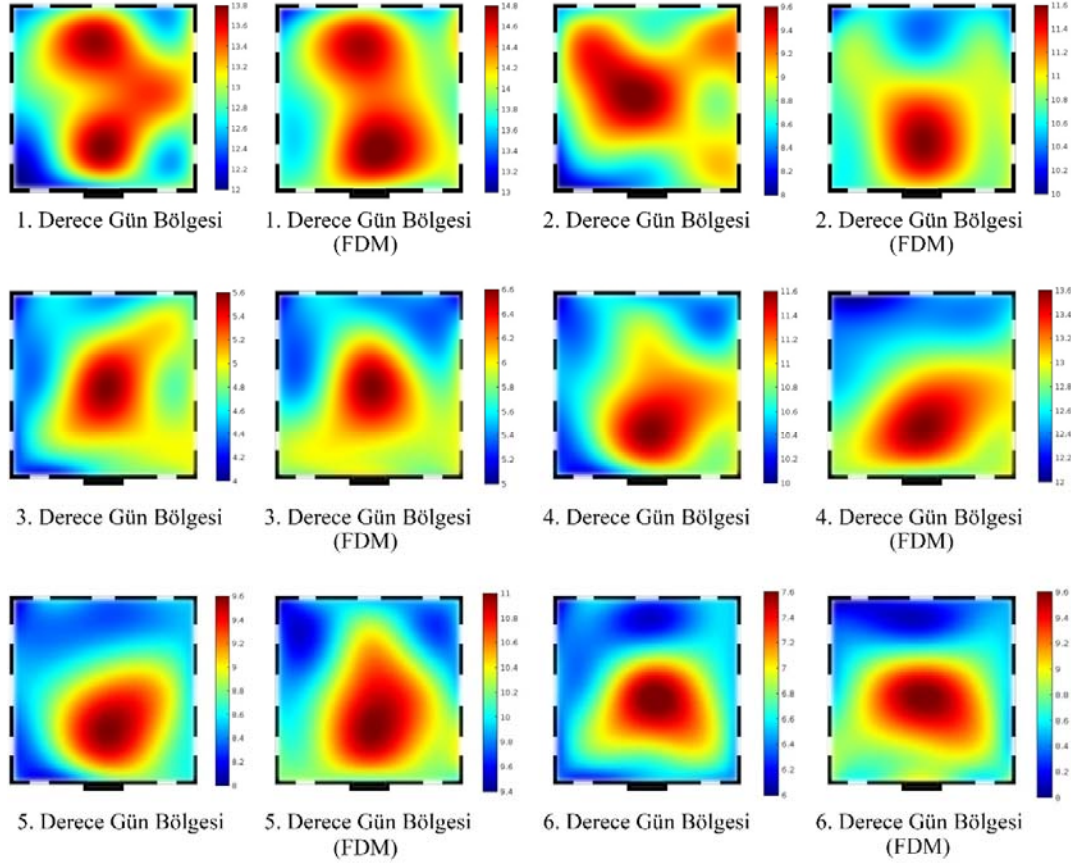


Şekil 15. 6.derece gün bölgesine ait FDM'li ve FDM'siz EnergyPlus simülasyon sonuçları
(6th degree day zone EnergyPlus simulation results with FDM and without FDM)

Elde edilen sonuçlar literatürdeki benzer çalışmalar ile kıyaslanarak çalışma sonuçlarının literatüre olan katkısı irdelenmiştir. Literatürde FDM (Faz değiştirici malzeme)'nin duvara entegrasyonu ile yapılan çalışmalar incelendiğinde FDM'nin iç mekân sıcaklığına olumlu katkı yaptığı gözlemlenmiştir [31, 33, 44, 45] Safi ve Daouas [53] yapmış oldukları çalışmada ılıman bir iklimde yapı kabuğuna FDM malzemesi ekleyerek enerji verimliliği ve sıcaklık dağılımlarını incelemiştir. Elde ettikleri bulgulara göre enerji tüketiminde %12,21 oranında ve yüzey sıcaklık dalgalanmalarında 5,35°C azalma tespit etmişlerdir. Kishore vd. [54] yapmış oldukları çalışmada FDM eklendiği bir duvarın iç mekânda yıllık ısı kazanımının %3,5-%47,2 aralığında, yıllık ısı kaybının ise %2,8-%8,3 oranlarında olduğunu saptamışlardır. Lygerakis vd. [51] yaptıkları çalışmada yıllık %12,8 oranında enerji tüketiminde azalma tespit etmişlerdir. Belirtilen ve incelenen literatür taramalarının mevcut çalışmayla uyuşan veriler içerdiği saptanmıştır. İncelenen çalışmalarda sıcak ve ılıman iklimlerde FDM'nin soğuk bölgelere göre daha verimli olduğu görülmektedir. Bu durum FDM'nin erime noktası ile

açıklanabilmektedir. Ayrıca FDM'nin duvarda bulunduğu bölge de sonuçları etkileyen bir diğer faktördür. Literatür araştırmalarında FDM'nin farklı yönlerde kullanımı söz konusudur. Elde edilen bulgular güneş ışınımını en fazla alan cephede verimliliğin daha fazla olduğunu göstermektedir. Mevcut çalışmada Türkiye özelinde değerlendirme yapıldığından güneş ışınımından en fazla verim alan cephelerin güney ve doğu cepheleri olduğu bilinmektedir. Literatürde coğrafi konuma bağlı olarak bu yöndeki etkilerin daha yüksek miktarlarda olduğu saptanmıştır. Literatürle bağlantılı olarak uyumlu verilerin yanında az miktarda bulunan sapma değerleri, yapı konumlarının enlemlerine bağlı olarak güneş radyasyon miktarlarının farklı olması ile açıklanabilmektedir.

Literatürde küçük ölçekte yapısal olmayan elemanlar için FDM'nin CFD analizlerine yönelik çalışmalar bulunmasına karşın yapısal ölçekte yapılan çalışmalar kısıtlıdır. Yapısal ölçekte yapılan CFD çalışmaları incelenmiş ve elde edilen veriler mevcut çalışma ile kıyaslanmıştır. Yang vd. [55] FDM eklentili panellerin CFD analizini



Şekil 16. Kış döneminde FDM'li ve FDM'siz CFD sonuçları (CFD results with and without FDM during winter)

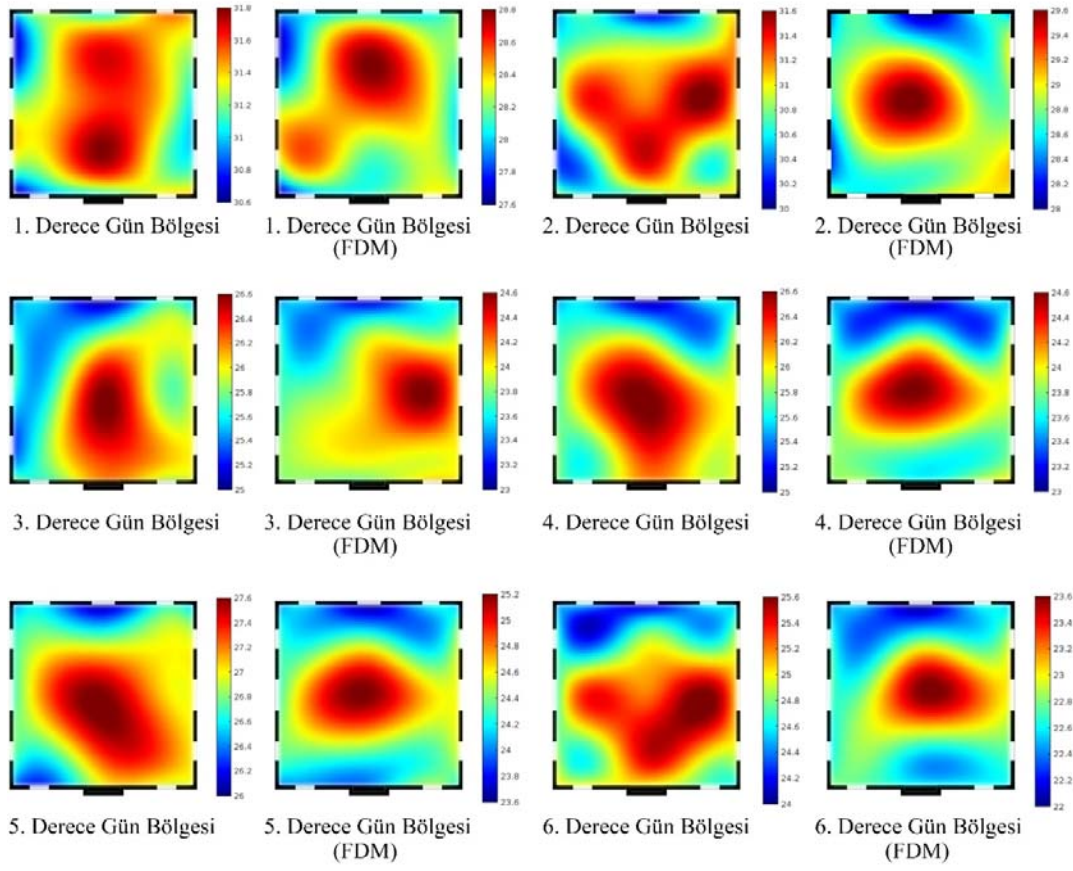
gerçekleştirmişlerdir. CFD analizleri FDM eklentili alandan iç mekâna doğru sıcaklık iyileştirmeleri olduğunu göstermiştir. Dabiri vd. [56] yapmış oldukları çalışmada FDM eklentili tuğlaların sıcak ve soğuk dönemlerde CFD analizini gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri analizlere göre FDM eklentili tuğla yaz döneminde sıcaklık azalması sağlarken, kış döneminde ise sıcaklık artışı sağlamıştır. Bu çalışmalara bağlı olarak mevcut çalışmada da benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir. FDM eklenen duvar bölgesinden iç mekâna doğru kış mevsiminde sıcaklık artışı, yaz mevsiminde ise sıcaklık azalması tespit edilmiştir.

Yapılarda ısıtma ve soğutma yüklerinin yüksek miktarlarda olduğu bilinmektedir. Aktif ısıtma ve soğutma araçlarının yaydığı emisyonlar ve bu araçların yıllık maliyet durumu modern dünyada problemler teşkil etmektedir. İç mekân hava sıcaklığının pasif olarak iyileştirilmesi sürdürülebilirlik açısından kıymetlidir. Mevcut çalışma belirtilen parametreler ekseninde FDM eklenerek farklı iklimlerde benzer yapılarda iç mekân sıcaklığı ve enerji tüketimini pasif bir yöntemle iyileştirmeyi vurgulamaktadır. Bu bağlamda çalışmanın literatürü zenginleştirilmesi ve literatürdeki özgün çalışmalara katkı sunması beklenmektedir.

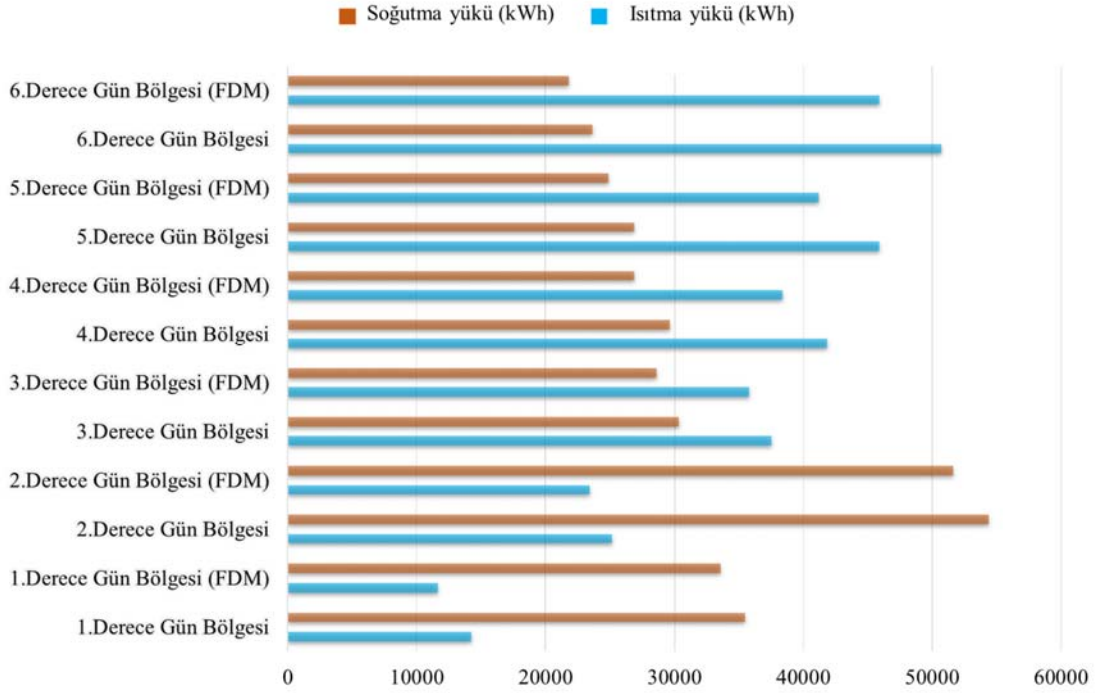
4. Simgeler (Symbols)

CFD : (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)
FDM : Faz değiştirici malzeme
 Q_{ab} : Duvar tarafından emilen güneş radyasyonu (W/m^2)
 Q_{ir} : Duvar ile atmosfer arasındaki uzun dalga radyasyon ısı transferi (W/m^2)
 Q_{cv} : Duvar ve çevresindeki hava arasında konvektif ısı

transferi ve ısı akışı (W/m^2)
 Q_{cd} : Duvardan iç mekâna ısı akışı (W/m^2)
 β : Duvar dış yüzeyinde güneş radyasyonunun emilim oranı
 I_s : Güneş radyasyon yoğunluğu (W/m^2)
 T_0^2 : Duvar dış yüzey sıcaklığının 2.kuvveti
 T_r^2 : Atmosferik radyasyon sıcaklığının 2.kuvveti
 σ : Stefan-Boltzmann sabiti
 ε : Yüzeyin emisyon katsayısı
 h_r : Duvar radyasyon ısı transfer katsayısı (W/m^2)
 h_{cv} : Duvarın konvektif ısı transfer katsayısı (W/m^2)
 T_r : Atmosferik radyasyon sıcaklığı ($^{\circ}C$)
 T_{hava} : Ortam sıcaklığı ($^{\circ}C$)
 T_0 : Duvar dış yüzey sıcaklığı ($^{\circ}C$)
 c_r : Isı iletim katsayısı
 m : Kütle
 Q_{in} : İç mekâna giren ısı miktarı
 Q_r : FDM katmanları arasındaki elemanlardan emilen ısı miktarı
 T_r : Endotermik sıcaklık,
 T_r' : Başlangıç sıcaklığı
 Q_{fdm} : FDM tabakası tarafından emilen ısı
 cs : FDM'nin katı fazının özgül ısısı
 H_s : Duyulur ısı miktarı
 T_{fdm} : Isı emilimi sonrasında FDM tabakasının sıcaklığı
 T_{fdm}' : Başlangıç sıcaklığı
 f : Sıvı faz oranı
 L : FDM katmanının gizli ısı değeri
 T_m : Erime sıcaklığı
 h_z : Isı transfer katsayısı
 T_z : Kapsamlı sıcaklık



Şekil 17. Yaz döneminde FDM’li ve FDM’siz CFD sonuçları (CFD results with and without FDM during summer)



Şekil 18. İklim bölgelerinde FDM’li ve FDM’siz ısıtma ve soğutma yükleri (Heating and cooling loads with FDM and without FDM in climate zones)

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada cami yapılarının iç mekân hava sıcaklığı ve enerji tüketimi açısından iyileştirilmesi, Türkiye’deki tip cami projeleri ve faz değiştirici malzeme (FDM) üzerinden ele alınmıştır. Camiler yönelmesi sabit yapılar olduklarından iç mekân hava sıcaklığı ve enerji tüketimi açısından problemler oluşabilmektedir. Yön sabitliğinin yanında Türkiye’deki tip cami projelerinin her iklim bölgesi için aynı form ve geometride inşa edilebilmesi, iç mekân sıcaklık dengesizliğini tetiklemektedir. Mevcut koşullara bağlı olarak farklı iklim bölgelerinde inşa edilen bu yapıların ısı iç mekân sıcaklığı açısından iyileştirilmesi hem kullanıcı sağlığı açısından hem de ekonomik olarak olumlu katkılar sunabilmektedir. Çalışma kapsamında 5 cm kalınlığında parafin bazlı faz değiştirici malzemesi güney duvarına entegre edilmiştir. FDM malzemesi EnergyPlus programında ‘Phase Changing Hysteresis’ başlığı altında modellenmiş ve iç mekandaki sıcaklık değerleri simüle edilmiştir. EnergyPlus programında elde edilen sıcaklık değerleri sayısal bir yöntemle doğrulanmıştır. Elde edilen verilere göre FDM eklenen cami yapılarında ısı konforun yaz mevsiminde 1.derece gün bölgesinde 2,1-3,4°C, 2.derece gün bölgesinde 2,5°C -3,5 °C, 3.derece gün bölgesinde 1,8 °C -2,7 °C, 4.derece gün bölgesinde 1,8 °C -2,5 °C, 5.derece gün bölgesinde 2-2,5 °C, 6.derece gün bölgesinde ise 1,9-2,8 °C aralığında azalış olduğu, kış mevsiminde ise 1.derece gün bölgesinde 1-1,4°C, 2.derece gün bölgesinde 1,1°C -1,7 °C, 3.derece gün bölgesinde 1,2 °C -2 °C, 4.derece gün bölgesinde 1,8 °C -3°C, 5.derece gün bölgesinde 1,8-2,9 °C, 6.derece gün bölgesinde ise 2,2-3,1 °C aralığında artış olduğu tespit edilmiştir. Bu iklim bölgelerinde yaz dönemi için sıcaklık azalışlarının en keskin hissedildiği zaman dilimi öğle ve ikinci namaz vakitleri, kış döneminde ise sıcaklık artışlarının en keskin hissedildiği zaman diliminin sabah ve yatsı namaz vakitlerinde olduğu görülmektedir. Yıllık ısıtma ve soğutma yüklerine yönelik olarak yapılan analizlerde ise 1, 2, 3, 4, 5 ve 6.derece iklim bölgelerinde; ısıtma yüklerinin sırasıyla %18,2, %6,9, %4,7 ve %8,2, %10,1 ve %9,5 azalış gösterdiği, soğutma yüklerinin ise sırasıyla %5,4, %5, %5,5, %9,3, %7,3 ve %7,9, azaldığı tespit edilmiştir. İç mekandaki ısı dağılımları CFD analizleri ile irdelendiğinde tüm iklim bölgelerinde FDM eklentili güney duvarından iç mekâna doğru ısı akışı olduğu ve iç mekânın genel olarak ısındığı saptanmaktadır. FDM malzemesinin iç mekân ısı dağılımına etkisi kış mevsiminde 1 ve 2.derece gün bölgelerinde, yaz mevsiminde ise 1, 2 ve 4.derece gün bölgelerinde daha dinamik hissedilmektedir. Ayrıca FDM eklentisinin iç mekandaki sıcaklık farklılıklarını da etkilediği sıcak veya soğuk uç değerlerin azaldığı tespit edilmiştir.

Çalışma kapsamındaki bulgular irdelendiğinde duvara entegre edilen FDM malzemesinin iç mekân sıcaklık değerlerini iyileştirdiği ve iç mekandaki ısı dengesini sağladığı görülmektedir. FDM malzemesinin yapı kabuğuna eklenmesiyle binalarda enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından önemli katkılar sunabilmektedir. Bu malzemeler iç mekân sıcaklıklarını dengeleyerek ısıtma ve soğutma yüklerini azaltabilmektedir. Ayrıca FDM kullanımının enerji tüketimini düşürerek ekonomik iyileştirmeler sağladığı da açıktır. Malzemenin diğer yönlerdeki duvar ve üst örtü sisteminde kullanımı verimi artırıcı özellikler olarak görülmektedir. Ancak FDM malzemesinin olumlu özellikleri ile birlikte yapılara tam olarak entegre edilmesine yönelik zorluklar da ele alınarak çözümlenmelidir. Literatürde FDM malzemesinin yapı kabuğuna entegrasyonuna yönelik olarak yapılan çalışmalarda temel problem maliyet olarak dikkat çekmektedir. Malzemenin pahalı olması ve yapı kabuğunda yüksek miktardaki kullanımı, ekonomik olarak problemler doğurmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda FDM malzemesinin geri kazanım süresinin ortalama olarak 18-22 yıl aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle malzemenin ekonomik uygulanabilirliği, duvar içerisindeki diğer bileşenlere etkisi ve iç mekân hava kalitesine

etkisinin de araştırılarak malzemenin kullanılabilirliği ve yapı kabuğuna entegrasyonuna yönelik girdiler elde etmek önemlidir.

Kaynaklar (References)

1. Global Status Report for Buildings and Construction. ISBN: 978-92-807-4131-5, 2022.
2. Karagöl, T., Kavaz, İ. Dünyada ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji. SETA, analiz dergisi, 4 (197), 5-32, 2017.
3. International Energy Agency. 2017, IEA statistics: World energy balances overview 2017.
4. Abdullah, F. H., Majid, N. H. A., Othman, R. Defining Issue of Thermal Comfort Control Through Urban Mosque Façade Design, Procedia-social and behavioral sciences, 234, 416-423, 2016.
5. Azmi, N. A., Arıcı, M., Baharun, A. A Review on The Factors Influencing Energy Efficiency of Mosque Buildings, Journal of cleaner production, 292, 126010, 2021.
6. Kahera, A., Abdulmalik, L., Anz, C. Design Criteria for Mosques and Islamic Centres. Routledge, 2009.
7. Harsritanto, B. I. R., Nugroho, S., Dewanta, F., Prabowo, A. R. Mosque Design Strategy For Energy and Water Saving, Open engineering, 11 (1), 723-733, 2021.
8. Azmi, N. A., Kandar, M. Z. Factors Contributing in the Design of Environmentally Sustainable Mosques, Journal of building engineering, 23, 27-37, 2019.
9. Azmi, N. A., Baharun, A., Arıcı, M., Ibrahim, S. H. Improving Thermal Comfort in Mosques of Hot-Humid Climates Through Passive and Low-Energy Design Strategies, Frontiers of architectural research, 12 (2), 361-385, 2023.
10. Ahriz, A., Mesloub, A., Elkhayat, K., Alghaseb, M. A., Abdelhafez, M. H., Ghosh, A. Development of a Mosque Design for a Hot, Dry Climate Based on A Holistic Bioclimatic Vision, Sustainability, 13 (11), 6254, 2021.
11. Atmaca, A. B., Gedik, G. Z. Evaluation Of Mosques in terms of Thermal Comfort and Energy Consumption in a Temperate-Humid Climate, Energy and buildings, 195, 195-204, 2019.
12. Manaf, M. Z. A., Mohamed, M. F., Yusoff, W. F. M., Sulaiman, M. K. A. M. A, Study on the Thermal Comfort of Prayer Hall Based on the Roof Design of Mosque with Natural Ventilation, International Journal of advanced science and technology, 29 (9), 1900–1915, 2020.
13. Sarıaydn E.U., Güçyeter B., Halaç H.H, Planning the Monitoring Process and Energy Performance Evaluation in Historical Buildings: The Case of Tiryakizade Süleyman Ağa Mosque, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 39 (2), 943-958, 2024.
14. Azmi, N. A., Ibrahim, S. H. A Comprehensive Review on Thermal Performance and Envelope Thermal Design of Mosque Buildings, Building and environment, 185, 107305, 2020.
15. Al-Tamimi, N., Qahtan, A., Abuelzein, O. Rear Zone for Energy Efficiency in Large Mosques in Saudi Arabia, Energy and buildings, 223, 110148, 2020.
16. Budaiwi, I., Abdou, A. HVAC System Operational Strategies for Reduced Energy Consumption in Buildings with Intermittent Occupancy: The Case of Mosques, Energy conversion and management, 73, 37-50, 2013.
17. Bughara, K. S., Arsan, Z. D., Akkurt, G. G. Applying Underfloor Heating System for Improvement of Thermal Comfort in Historic Mosques: The Case Study of Salepçioğlu Mosque, Izmir, Turkey, Energy procedia, 133, 290-299, 2017.
18. Al-Homoud, M. S., Abdou, A. A., Budaiwi, I. M. Assessment of Monitored Energy Use and Thermal Comfort Conditions in Mosques in Hot-Humid Climates, Energy and buildings, 41 (6), 607-614, 2009.
19. Al-ajmi, F. F. Thermal Comfort in Air-Conditioned Mosques in the Dry Desert Climate, Building and environment, 45, 2407–2413, 2010.
20. Yüksel, A., Arıcı, M., Krajčik, M., Karabay, H. Experimental Investigation of Thermal Comfort and CO2 Concentration in Mosques: A Case Study in Warm Temperate Climate of Yalova, Turkey, Sustainable cities and society, 52, 101809, 2020.
21. Yusoff, W. F. M. Initial Assessment of Indoor Environmental Condition and Thermal Comfort of Malaysia Heritage Mosque, Jurnal kejuruteraan, 32 (2), 271–280, 2020.
22. Yusoff, M., Fatimah, W. Indoor Thermal Comfort in Modern Mosque of Tropical Climate, International journal of architecture and planning (ICONARP), 9 (2), 720-741, 2021.

23. Hussin, A., Salleh, E., Chan, H. Y., Mat, S. The Reliability of Predicted Mean Vote Model Predictions in an Air-Conditioned Mosque During Daily Prayer Times in Malaysia, *Architectural science review*, 58 (1), 67–76, 2015.
24. Kahwaji, S., White, M. A. Organic Phase Change Materials for Thermal Energy Storage: Influence of Molecular Structure on Properties, *Molecules*, 26 (21), 6635, 2021.
25. Wang, X., Li, W., Luo, Z., Wang, K., Shah, S. P. A Critical Review on Phase Change Materials (PCM) for Sustainable and Energy Efficient Building: Design, Characteristic, Performance and Application, *Energy and buildings*, 260, 111923, 2022.
26. Rao, V. V., Parameshwaran, R., Ram, V. V. PCM-Mortar Based Construction Materials for Energy Efficient Buildings: A Review on Research Trends, *Energy and buildings*, 158, 95-122, 2018.
27. Lamrani, B., Johannes, K., Kuznik, F. Phase Change Materials Integrated into Building Walls: An updated review, *Renewable and sustainable energy reviews*, 140, 110751, 2021.
28. Xiong, Q., Alshehri, H. M., Monfaredi, R., Tayebi, T., Majdoub, F., Hajjar, A., Delpisheh, M., Izadi, M. Application of Phase Change Material in Improving Trombe Wall Efficiency: An up-to-date and Comprehensive Overview, *Energy and buildings*, 258, 111824, 2022.
29. Meng, E., Yu, H., Zhou, B. Study of the Thermal Behavior of the Composite Phase Change Material (PCM) Room in Summer and Winter, *Applied thermal engineering*, 126, 212-225, 2017.
30. Cengiz H.T., Gedik G.Z., Korkmaz E., Evaluation of energy-efficient retrofits in glazing areas of building envelope and the impact of PCM application on energy performance: A case study in İstanbul and Diyarbakır, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39 (4), 2395-2408, 2024.
31. Kheradmand, M., Azenha, M., de Aguiar, J. L., Castro-Gomes, J. Experimental and Numerical Studies of Hybrid PCM Embedded in Plastering Mortar for Enhanced Thermal Behaviour of Buildings, *Energy*, 94, 250-261, 2016.
32. El Rhafiki, T., Kousksou, T., Allouhi, A., Benomar, W., Zennouhi, H., Jamil, A., Zeraoui, Y. Numerical Analysis of a Micro-encapsulated PCM Wallboard: Fluxmeter Applications, *Journal of building engineering*, 14, 127-133, 2017.
33. Mahdaoui, M., Hamdaoui, S., Msaad, A. A., Kousksou, T., El Rhafiki, T., Jamil, A., Ahachad, M. Building Bricks with Phase Change Material (PCM): Thermal Performances, *Construction and building materials*, 269, 121315, 2021.
34. İlgar G., Terhan M., Effect of Thickness and Melting Temperature of Phase Change Material Integrated Into Exterior Wall on Building Energy Performance and CO2 Emission Reduction, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39 (2), 959-976, 2024.
35. Soares, N., Gaspar, A. R., Santos, P., Costa, J. J. Multi-Dimensional Optimization of the Incorporation of PCM-Drywalls in Lightweight Steel-Framed Residential Buildings in Different Climates, *Energy and buildings*, 70, 411-421, 2014.
36. Lee, K. O., Medina, M. A., Raith, E., Sun, X. Assessing the Integration of a Thin Phase Change Material (PCM) Layer in a Residential Building Wall for Heat Transfer Reduction and Management, *Applied energy*, 137, 699-706, 2015.
37. 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*, 175, 324-336, 2016.
38. Wang, X., Yu, H., Li, L., Zhao, M. Experimental Assessment on the Use of Phase Change Materials (PCMs)-Bricks in the Exterior Wall of a Full-Scale Room, *Energy conversion and management*, 120, 81-89, 2016.
39. Fateh, A., Klinker, F., Brütting, M., Weinläder, H., Devia, F. Numerical and Experimental Investigation of an Insulation Layer with Phase Change Materials (PCMs), *Energy and buildings*, 153, 231-240, 2017.
40. Saafi, K., Daouas, N. Energy and Cost Efficiency of Phase Change Materials Integrated in Building Envelopes Under Tunisia Mediterranean Climate, *Energy*, 187, 115987, 2019.
41. Li, D., Zheng, Y., Liu, C., Wu, G. Numerical Analysis on Thermal Performance of Roof Contained PCM of a Single Residential Building, *Energy conversion and management*, 100, 147-156, 2015.
42. Nurlybekova, G., Memon, S. A., Adilkhanova, I. Quantitative Evaluation of the Thermal and Energy Performance of the PCM Integrated Building in the Subtropical Climate Zone for Current and Future Climate Scenario, *Energy*, 219, 119587, 2021.
43. Barzin, R., Chen, J. J., Young, B. R., Farid, M. M. Application of PCM Underfloor Heating in Combination with PCM Wallboards for Space Heating Using Price-Based Control System, *Applied energy*, 148, 39-48, 2015.
44. Ahangari, M., Maerefat, M. An Innovative PCM System for Thermal Comfort Improvement and Energy Demand Reduction in Building Under Different Climate Conditions, *Sustainable cities and society*, 44, 120-129, 2019.
45. Souayfane, F., Biwole, P. H., Fardoun, F., Achard, P. Energy Performance and Economic Analysis of a TIM-PCM Wall Under Different Climates, *Energy*, 169, 1274-1291, 2019.
46. TS825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları, 2024.
47. Freemetoo veri tabanı, URL 1: <https://freemetoo.me/> Erişim Tarihi: Şubat 2, 2025.
48. URL 2: <https://iranpetrochemical/paraffin-wax-solid/> Erişim Tarihi: Kasım 15, 2025
49. Devaux, P., Farid, M. M. Benefits of PCM Underfloor Heating with PCM Wallboards for Space Heating in Winter, *Applied energy*, 191, 593-602, 2017.
50. Pandey, B., Banerjee, R., Sharma, A. Coupled EnergyPlus and CFD Analysis of PCM for Thermal Management of Buildings, *Energy and buildings*, 231, 110598, 2021.
51. Lygerakis, F., Gioti, C., Gournis, D., Yentekakis, I. V., Karakassides, M., Kolokotsa, D. Enhancing Building Energy Efficiency with Innovative Paraffin-Based Phase Change Materials, *Energies*, 17 (16), 4155, 2024.
52. Jiang, L., Gao, Y., Zhuang, C., Feng, C., Zhang, X., Guan, J. Experiment Verification and Simulation Optimization of Phase Change Material Cool Roof in Summer-A Case Study of Chongqing, China, *Energy*, 293, 130613, 2024.
53. Saafi, K., Daouas, N. Energy and Cost Efficiency of Phase Change Materials Integrated in Building Envelopes Under Tunisia Mediterranean Climate, *Energy*, 187, 115987, 2019.
54. Kishore, R. A., Bianchi, M. V., Booten, C., Vidal, J., Jackson, R. Parametric and Sensitivity Analysis of A PCM-Integrated Wall for Optimal Thermal Load Modulation in Lightweight Buildings, *Applied thermal engineering*, 187, 116568, 2021.
55. Yang, S., Zhang, Y., Zhao, Y., Torres, J. F., Wang, X. PCM-Based Ceiling Panels for Passive Cooling in Buildings: A CFD Modelling, *Energy and buildings*, 285, 112898, 2023.
56. Dabiri, S., Mehrpooya, M., Nezhad, E. G. Latent and Sensible Heat Analysis of PCM Incorporated in a Brick for Cold and Hot Climatic Conditions, Utilizing Computational Fluid Dynamics, *Energy*, 159, 160-171, 2018.