KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİMARLIK

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ISI YALITIM VE FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME ESASLI DUVAR KESİTLERİNİN TÜRKİYE'NİN İKLİM BÖLGELERİNDEKİ ENERJİ PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRILMASI

DOĞUKAN KADİR YEMENİCİ

KOCAELİ 2025

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİMARLIK

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ISI YALITIM VE FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME ESASLI DUVAR KESİTLERİNİN TÜRKİYE'NİN İKLİM BÖLGELERİNDEKİ ENERJİ PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRILMASI

DOĞUKAN KADİR YEMENİCİ

Dr. Öğr. Üyesi Kübra EKİZ BARIŞ

Danışman, Kocaeli Üniversitesi .....

Dr. Öğr. Üyesi Senem MÜŞTAK SEVİNDİK

Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi .....

Dr. Öğr. Üyesi Nazife ÖZER

Jüri Üyesi, Erzurum Teknik Üniversitesi .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 18.06.2025

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmasında,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

■ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler ..... tarafından ..... no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....

Doğukan Kadir YEMENİCİ

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.
Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.
Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan ***"Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge"*** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

■ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

.....

Doğukan Kadir YEMENİCİ

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Mimarlık disiplininin sürekli değişen gereksinimleri, yapı malzemelerine yönelik araştırmaları daha da önemli hale getirmiştir. Akademik yaşamım boyunca edindiğim kuramsal bilgi ve araştırma becerilerini, bu çalışmada bütüncül bir yaklaşımla bir araya getirmeye özen gösterdim. Bu süreçte karşılaştığım bilimsel ve teknik sorunlara çözüm üretmek, mesleki gelişimime önemli katkılar sağlamıştır.

Bu tez, yalnızca bir akademik çalışmanın sonucu değil; aynı zamanda araştırma, sabır ve kararlılıkla örülmüş kişisel bir yolculuğun ürünüdür.

Akademik danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Kübra Ekiz Barış'a; bilgi, deneyim ve rehberliğiyle bu sürecin her aşamasında yanımda olduğu için teşekkür ederim. Araştırma konusunu geliştirmemde ve çalışmamı yönlendirmemde gösterdiği sabır ve anlayış, bu tezin şekillenmesinde büyük rol oynamıştır. Ayrıca, bana her zaman destek olan aileme; özellikle motivasyonumu korumamda ve bu süreci başarıyla tamamlamamda verdikleri manevi destek için sonsuz minnet duygularımı sunarım.

Haziran – 2025 Mimar Doğukan Kadir YEMENİCİ

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
ŞEKİLLER DİZİNİ vi
TABLOLAR DİZİNİ xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xiv
ÖZET xvi
ABSTRACT xvii
1. GİRİŞ 1
2. GENEL BİLGİLER 4
2.1. Kapsam 4
2.2. Yaygın Etki 4
2.3. Yöntem 5
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 7
3.1. Türkiye'nin İklim Bölgeleri 7
3.1.1. Sıcak Nemli İklim Bölgesi 7
3.1.2. Sıcak Kuru İklim Bölgesi 8
3.1.3. Ilımlı Nemli İklim Bölgesi 8
3.1.4. Ilımlı Kuru İklim Bölgesi 9
3.1.5. Soğuk İklim Bölgesi 9
3.2. Enerji Depolama Sistemleri 10
3.2.1. Isıl Enerji Depolama Sistemi 11
3.2.1.1. Duyulur Isı Depolama 12
3.2.1.2. Gizli Isı Depolama 12
3.2.1.3. Termokimyasal Enerji Depolama 13
3.3. Gizli Isı Depolama Sistemlerinde Kullanılan Faz Değiştiren Malzemeler 14
3.3.1. Faz Değiştiren Malzemelerin Tanımı ve Özellikleri 14
3.3.2. Faz Değiştiren Malzemelerin Sınıflandırılması 14
3.3.2.1. Organik Faz Değiştiren Malzemeler 14
3.3.2.2. İnorganik Faz Değiştiren Malzemeler 15
3.3.2.3. Ötektik Karışımlar 15
3.3.3. Faz Değiştiren Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları 15
3.3.4. Faz Değiştiren Malzemelerin Hazırlanma Yöntemleri 16
3.3.4.1. Daldırma Yöntemi 16
3.3.4.2. Doğrudan Birleştirme Yöntemi 17
3.3.4.3. Kapsülleme Yöntemi 17
3.3.4.4. Şekil Stabilleştirme Yöntemi 18
3.3.5. Mimari Tasarımda Faz Değiştiren Malzeme Kullanımı 19
3.3.6. Faz Değiştiren Malzemelerin Üretim ve Uygulanmasına Yönelik Standartlar 24
3.4. Konu İle İlgili Literatür Araştırmalarının Değerlendirilmesi 26
4. MALZEME VE YÖNTEM 36
4.1. Simüle Edilen Bina Özellikleri 36
4.2. Etkinliği Araştırılan Duvar Kesitleri 37

4.3. Kullanılan Malzemeler 40
4.4. İklim Verileri 41
4.5. Simülasyon Detayları 43
4.6. Hesaplama Yöntemleri 45
5. BULGULAR 48
5.1. Yalnızca FDM İçeren Yapı Kabuğuna Ait Bulgular 48
5.1.1. FDM Konumu, Kalınlığı ve Erime Sıcaklığının Isıl Performans Üzerindeki Etkisi 48
5.1.2. FDM Konumu, Kalınlığı ve Erime Sıcaklığının Enerji Tasarrufu Üzerindeki Etkisi 67
5.2. FDM ve IY İçeren Yapı Kabuğuna Ait Bulgular 86
5.2.1. FDM ve IY Konumu, Kalınlığı ve FDM Erime Sıcaklığının Isıl Performansı Üzerindeki Etkisi 86
5.2.2. FDM ve IY Konumu, Kalınlığı ve FDM Erime Sıcaklığının Enerji Tasarrufu Üzerindeki Etkisi 104
5.3. Ekonomik Bulgular 125
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 131
KAYNAKLAR 134
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER 145
ÖZGEÇMİŞ 146

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Derece gün bölgelerine göre iller 7
Şekil 3.2. Fosil yakıtların toplam enerji tüketimi 10
Şekil 3.3. Isıl enerji depolama sistemlerinin sınıflandırılması 11
Şekil 3.4. Duyulur ve gizli ısı depolama 13
Şekil 3.5. FDM'nin doğrudan birleştirme yöntemi ile test duvarında uygulanması 17
Şekil 3.6. Kapsülleme örnekleri 18
Şekil 3.7. Şekil stabilleştirilmiş FDM gösterimi 18
Şekil 3.8. Mark Group Eco House projesi 19
Şekil 3.9. BASF Micronal FDM 20
Şekil 3.10. Charles Sturt Üniversitesi'nin Albury'deki Thurgoona Kampüsü 20
Şekil 3.11. DuPont, Energain ürünü uygulaması 21
Şekil 3.12. Phase Change Energy Solutions, BioPCM 21
Şekil 3.13. Victoria'daki 9 Yıldızlı NatHERS dereceli konut projesi 22
Şekil 3.14. GlassX, Crystal ürünü uygulaması 23
Şekil 3.15. EcoCore panelleri 23
Şekil 3.16. (a) Smart is Green konut projesi; (b) Uygulanan FDM perdeleri 24
Şekil 4.1. Temsili illere ait 20-22 Ocak tarihlerindeki dış ortam sıcaklığı-zaman grafiği 44
Şekil 4.2. Temsili illere ait 20-22 Temmuz tarihlerindeki dış ortam sıcaklığı-zaman grafiği 44
Şekil 5.1. Antalya'da referans ve yalnızca FDM-21 entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması 48
Şekil 5.2. Antalya'da referans ve yalnızca FDM-27 entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması 49
Şekil 5.3. İstanbul'da referans ve yalnızca FDM-21 entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması 49
Şekil 5.4. İstanbul'da referans ve yalnızca FDM-27 entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması 50
Şekil 5.5. Ankara'da referans ve yalnızca FDM-21 entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması 50
Şekil 5.6. Ankara'da referans ve yalnızca FDM-27 entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması 51
Şekil 5.7. Van'da referans ve yalnızca FDM-21 entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması 51

Şekil 5.8. Van'da referans ve yalnızca FDM-27 entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....52
Şekil 5.9. Erzurum'da referans ve yalnızca FDM-21 entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....52
Şekil 5.10. Erzurum'da referans ve yalnızca FDM-27 entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....53
Şekil 5.11. FDM konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığının kış döneminde iç ortamın SDA değeri üzerindeki etkileri: (a) FDM-21 ºC; (b) FDM-27 ºC....54
Şekil 5.12. Antalya'da referans ve yalnızca FDM-21 entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....58
Şekil 5.13. Antalya'da referans ve yalnızca FDM-27 entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....59
Şekil 5.14. İstanbul'da referans ve yalnızca FDM-21 entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....59
Şekil 5.15. İstanbul'da referans ve yalnızca FDM-27 entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....60
Şekil 5.16. Ankara'da referans ve yalnızca FDM-21 entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....60
Şekil 5.17. Ankara'da referans ve yalnızca FDM-27 entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....61
Şekil 5.18. Van'da referans ve yalnızca FDM-21 entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....61
Şekil 5.19. Van'da referans ve yalnızca FDM-27 entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....62
Şekil 5.20. Erzurum'da referans ve yalnızca FDM-21 entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....62
Şekil 5.21. Erzurum'da referans ve yalnızca FDM-27 entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....63
Şekil 5.22. FDM konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığının yaz döneminde iç ortamın SDA değeri üzerindeki etkileri: (a) FDM-21 ºC; (b) FDM-27 ºC....64
Şekil 5.23. Antalya'da referans ve FDM-21 entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi....68

Şekil 5.24. Antalya'da referans ve FDM-27 entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi 68
Şekil 5.25. İstanbul'da referans ve FDM-21 entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi 69
Şekil 5.26. İstanbul'da referans ve FDM-27 entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi 69
Şekil 5.27. Ankara'da referans ve FDM-21 entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi 70
Şekil 5.28. Ankara'da referans ve FDM-27 entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi 70
Şekil 5.29. Van'da referans ve FDM-21 entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi 71
Şekil 5.30. Van'da referans ve FDM-27 entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi 71
Şekil 5.31. Erzurum'da referans ve FDM-21 entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi 72
Şekil 5.32. Erzurum'da referans ve FDM-27 entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi 72
Şekil 5.33. Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde yer alan FDM-21 entegre edilmiş eğitim binalarında FDM konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığının ısıtma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri 74
Şekil 5.34. Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde yer alan FDM-27 entegre edilmiş eğitim binalarında FDM konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığının ısıtma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri 75
Şekil 5.35. Antalya'da referans ve FDM-21 entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi....77
Şekil 5.36. Antalya'da referans ve FDM-27 entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi....77
Şekil 5.37. İstanbul'da referans ve FDM-21 entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi....78
Şekil 5.38. İstanbul'da referans ve FDM-27 entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi....78
Şekil 5.39. Ankara'da referans ve FDM-21 entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi....79
Şekil 5.40. Ankara'da referans ve FDM-27 entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi....79
Şekil 5.41. Van'da referans ve FDM-21 entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi....80
Şekil 5.42. Van'da referans ve FDM-27 entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi....80
Şekil 5.43. Erzurum'da referans ve FDM-21 entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi....81
Şekil 5.44. Erzurum'da referans ve FDM-27 entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi....81

Şekil 5.45. Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde yer alan FDM-21 entegre edilmiş eğitim binalarında FDM konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığının soğutma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri 82
Şekil 5.46. Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde yer alan FDM-27 entegre edilmiş eğitim binalarında FDM konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığının soğutma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri 83
Şekil 5.47. Referans ve ideal performans gösteren FDM(i) ve FDM(d) duvar kesitlerinin yıllık toplam ısıtma-soğutma enerjisi ve toplam enerji tüketimi değerleri 85
Şekil 5.48. Antalya'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....86
Şekil 5.49. Antalya'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....87
Şekil 5.50. İstanbul'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....87
Şekil 5.51. İstanbul'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....88
Şekil 5.52. Ankara'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....88
Şekil 5.53. Ankara'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....89
Şekil 5.54. Van'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....89
Şekil 5.55. Van'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....90
Şekil 5.56. Erzurum'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....90
Şekil 5.57. Erzurum'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....91
Şekil 5.58. Antalya'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının kış döneminde iç ortamın SDA değeri üzerindeki etkileri 92
Şekil 5.59. İstanbul'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının kış döneminde iç ortamın SDA değeri üzerindeki etkileri 92

Şekil 5.60. Ankara'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının kış döneminde iç ortamın SDA değeri üzerindeki etkileri 93
Şekil 5.61. Van'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının kış döneminde iç ortamın SDA değeri üzerindeki etkileri 93
Şekil 5.62. Erzurum'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının kış döneminde iç ortamın SDA değeri üzerindeki etkileri 94
Şekil 5.63. Antalya'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....95
Şekil 5.64. Antalya'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....95
Şekil 5.65. İstanbul'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....96
Şekil 5.66. İstanbul'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....96
Şekil 5.67. Ankara'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....97
Şekil 5.68. Ankara'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....97
Şekil 5.69. Van'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....98
Şekil 5.70. Van'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....98
Şekil 5.71. Erzurum'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....99
Şekil 5.72. Erzurum'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması....99
Şekil 5.73. Antalya'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının yaz döneminde iç ortamın SDA değeri üzerindeki etkileri 101
Şekil 5.74. İstanbul'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının yaz döneminde iç ortamın SDA değeri üzerindeki etkileri 101
Şekil 5.75. Ankara'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının yaz döneminde iç ortamın SDA değeri üzerindeki etkileri 102

Şekil 5.76. Van'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının yaz döneminde iç ortamın SDA değeri üzerindeki etkileri 102
Şekil 5.77. Erzurum'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının yaz döneminde iç ortamın SDA değeri üzerindeki etkileri 103
Şekil 5.78. Antalya'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi 104
Şekil 5.79. Antalya'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi 105
Şekil 5.80. İstanbul'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi 105
Şekil 5.81. İstanbul'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi 106
Şekil 5.82. Ankara'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi 106
Şekil 5.83. Ankara'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi 107
Şekil 5.84. Van'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi 107
Şekil 5.85. Van'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi 108
Şekil 5.86. Erzurum'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi 108
Şekil 5.87. Erzurum'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi 109
Şekil 5.88. Antalya'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının ısıtma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri 110
Şekil 5.89. İstanbul'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının ısıtma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri 110
Şekil 5.90. Ankara'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının ısıtma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri 111
Şekil 5.91. Van'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının ısıtma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri 111
Şekil 5.92. Erzurum'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının ısıtma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri 112
Şekil 5.93. Antalya'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi....113
Şekil 5.94. Antalya'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi....113
Şekil 5.95. İstanbul'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi....114

Şekil 5.96. İstanbul'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi....114
Şekil 5.97. Ankara'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi....115
Şekil 5.98. Ankara'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi....115
Şekil 5.99. Van'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi....116
Şekil 5.100. Van'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi....116
Şekil 5.101. Erzurum'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi....117
Şekil 5.102. Erzurum'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi....117
Şekil 5.103. Antalya'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının soğutma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri....119
Şekil 5.104. İstanbul'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının soğutma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri....119
Şekil 5.105. Ankara'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının soğutma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri....120
Şekil 5.106. Van'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının soğutma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri....120
Şekil 5.107. Erzurum'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının soğutma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri....121
Şekil 5.108. Referans ve ideal performans gösteren FDM-21 ve IY duvar kesitlerinin yıllık toplam ısıtma-soğutma enerjisi ve toplam enerji tüketimi değerleri....122
Şekil 5.109. Referans ve ideal performans gösteren FDM-27 ve IY duvar kesitlerinin yıllık toplam ısıtma-soğutma enerjisi ve toplam enerji tüketimi değerleri....123
Şekil 5.110. İdeal performans gösteren FDM-IY duvar kesitlerinin iklim bölgelerindeki ısıtma-soğutma enerjisi tasarruf oranları....124
Şekil 5.111. Türkiye'nin iklim bölgelerine göre geri ödeme süreleri....126

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. FDM'lerin avantaj ve dezavantajları 16
Tablo 3.2. FDM-IY içeren yapı kabuğunun soğutma yükü üzerinde FDM ve IY konumunun, kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının etkilerinin araştırılması 28
Tablo 3.3. FDM-IY içeren yapı kabuğunun ısıtma yükü üzerinde FDM ve IY konumunun, kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının etkilerinin araştırılması 30
Tablo 3.4. FDM-IY içeren yapı kabuğunun soğutma ve ısıtma yükü üzerinde FDM ve IY konumunun, kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının etkilerinin araştırılması 34
Tablo 4.1. Binanın geometrik modeli ve binaya ilişkin veriler 37
Tablo 4.2. Çalışmada simüle edilen yapı kabuğu katmanlarına ait kombinasyonlar 38
Tablo 4.3. Yapı kabuğu katmanlarının tasarımı 40
Tablo 4.4. Kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri 40
Tablo 4.5. FDM'nin termofiziksel özellikleri 40
Tablo 4.6. Seçilen illerdeki güneş radyasyonu yoğunlukları ve güneşlenme süreleri 42
Tablo 4.7. EMT ve GÖS hesaplamalarında kullanılan parametreler 47
Tablo 5.1. EMT Farklı çalışmalarda tespit edilen GÖS'lerin karşılaştırılması 129

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

μ	: Mikro
μm	: Mikrometre
cm	: Santimetre
J	: Joule
K	: Kelvin
kg	: Kilogram
kr	: Kuruş
kWh	: Kilo-watt Hours (KiloWatt Saat)
m	: Metre
m^2	: Metrekare
m^3	: Metreküp
mm	: Milimetre
U	: Isı İletim Katsayısı
W	: Watt

Kısaltmalar

ASHRAE	: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (Amerikan Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Derneği)
CO_2	: Karbondioksit
DM	: Doğalgaz Maliyeti
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
EDS	: Enerji Depolama Sistemi
EM	: Elektrik Maliyeti
EMT	: Enerji Maliyet Tasarrufu
EPS	: Genleştirilmiş Polistren Köpük
ET	: Enerji Tüketimi
$ET_{kış}$	: Yıllık Toplam Isıtma Enerjisi Tüketimi
ET_{yaz}	: Yıllık Toplam Soğutma Enerjisi Tüketimi
FDM	: Faz Değiştiren Malzeme
GÖS	: Geri Ödeme Süresi
HFM	: Isı Akış Ölçer Cihazı
IED	: Isıl Enerji Depolama
IETO	: Isıtma Enerjisi Tasarruf Oranı
ISTA	: Uluslararası Güvenli Taşıma Derneği
IY	: Isı Yalıtım Malzemesi
$İS_{FDM}$	: FDM Kurulumu için İşçi Sayısı
$İS_{IY}$	: IY Kurulumu için İşçi Sayısı
K_{FDM}	: FDM Kurulum Maliyeti
K_{IY}	: IY Kurulum Maliyeti
M_{FDM}	: FDM Maliyeti
M_{IY}	: IY Maliyeti
NZE	: Net Sıfır Emisyon
PCM	: Phase Change Material (Faz Değiştiren Malzeme)

PEG : Polietil Glikol
PU : Poliüretan
SDA : Sıcaklık Dalgalanmalarında Azalma
T_f : Enerji Depolama Sürecinin Bitiş Sıcaklığı
T_i : Enerji Depolama Sürecinin Başlangıç Sıcaklığı
T_m : Gizli Isı Depolama Durumunda FDM'nin Erime Sıcaklığı
TS : Türk Standartı
UNEP : United Nations Environment Programme (Birleşmiş Milletler Çevre Programı)
V_{FDM} : FDM Hacmi
V_{IY} : IY Hacmi

ISI YALITIM VE FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME ESASLI DUVAR KESİTLERİNİN TÜRKİYE'NİN İKLİM BÖLGELERİNDEKİ ENERJİ PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

Dünya genelinde inşaat sektörü, binaların ısıtma ve soğutma süreçlerindeki yüksek enerji gereksinimi nedeniyle sürdürülebilirlik bağlamında önemli bir konumda yer almaktadır. Artan enerji talebi, sektörün çevresel etkilerini azaltmaya yönelik çözüm arayışlarını daha da öncelikli hale getirmiştir. Enerji etkinliği sağlamaya yönelik yöntemlerden biri olan ısıl enerji depolama sistemleri, ısıtma ve soğutma süreçlerinde önemli ölçüde tasarruf sağlamaktadır. Isıl enerji depolama sistemlerinde gizli ısıyı depolayabilme özellikleriyle öne çıkan faz değiştiren malzemeler, binalarda enerji etkinliğini artırmaya yönelik yenilikçi bir çözüm sunmaktadır. Türkiye'de TS 825 kapsamında tanımlanan beş farklı iklim bölgesinde, yapı kabuğunun ısıl performans gereksinimleri farklılık göstermektedir. Bu bağlamda bu tez çalışmasının amacı, faz değiştiren malzeme ve ısı yalıtım malzemelerinin birlikte kullanıldığı bir eğitim binasının, Türkiye'nin beş farklı iklim bölgesi özelinde ısıl ve enerji performansı açısından değerlendirilmesidir. İç ortam sıcaklık dalgalanmalarının azaltılması, enerji tüketiminin düşürülmesi ve ekonomik optimizasyon sağlanması çalışmanın temel hedeflerindendir. Analizlerde, faz değiştiren malzemenin faz geçiş sürecini doğru biçimde inceleyebilmek amacıyla Sonlu Farklar Hesaplama Yöntemi'ne dayanan DesignBuilder® yazılımı kullanılmıştır. Yapı modeli oluşturulmuş, farklı duvar kesitleri tasarlanmış ve gerek yaz gerekse kış mevsimi koşullarında enerji simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, faz değiştiren malzeme ve ısı yalıtımı kombinasyonunun, yalnızca faz değiştiren malzeme kullanımına nazaran daha etkili sıcaklık dalgalanmalarında azalma sağladığı ve ısıtma-soğutma kaynaklı enerji ihtiyacını azaltarak termal konfor düzeyini artırdığı belirlenmiştir. Her bir iklim bölgesinde uygulanması gereken dış duvar kesitinin farklı kalınlıklara sahip faz değiştiren malzeme ve ısı yalıtımdan oluşması gerektiği anlaşılmıştır. Genel olarak, geri ödeme süresi en düşük olan bölgeler sıcak ve ılıman iklime sahip iller olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Ekonomik Optimizasyon, Enerji Performansı, Faz Değiştiren Malzeme, Isıl Performans, Yapı Kabuğu.

COMPARISON OF THE ENERGY PERFORMANCE OF THERMAL INSULATION AND PHASE CHANGE MATERIAL-BASED WALL SECTIONS IN CLIMATE REGIONS OF TÜRKİYE

ABSTRACT

Worlwide, the construction sector occupies a significant position in terms of sustainability due to the high energy demands associated with the heating and cooling processes of buildings. Increasing global energy demand has prioritized the search for solutions to reduce the environmental impacts of the sector. One of the methods to enhance energy efficiency is the use of thermal energy storage systems, which offer considerable savings in heating and cooling. In these systems, phase change materials, which are notable for their ability to store latent heat, present an innovative solution to improve energy performance in buildings. In Türkiye, thermal performance requirements for building envelopes vary across five different climate zones defined by TS 825. In this context, the aim of this thesis is to evaluate the thermal and energy performance of an educational building in which phase change material and thermal insulation materials are used together, across Türkiye's five climate zones. The main objectives of the study are to reduce indoor temperature reductions, lower energy consumption, and ensure economic optimization. For accurate analysis of the phase change material phase transition process, the DesignBuilder® software, based on the Finite Difference Method, was employed. The building was modeled, various wall section configurations were developed, and energy simulations were conducted under both summer and winter conditions. The results indicated that the phase change material and thermal insulation combination was more effective than using phase change material alone in reducing temperature fluctuations, lowering heating and cooling energy demand, and enhancing thermal comfort. It was also found that for each climate zone, the external wall assembly should consist of phase change materials and thermal insulation materials with varying thicknesses. Overall, the shortest payback periods were observed in provinces with warm and mild climates.

Keywords: Economic Optimization, Energy Performance, Phase Change Material, Thermal Performance, Building Envelope.

1. GİRİŞ

2050'ye kadar iklim değişikliğinin yaklaşan ciddi sonuçlarından kaçınılması ve yaşanılabilir bir çevrenin korunması için küresel ortalama sıcaklık artışının sanayi öncesi döneme kıyasla 1,5 °C ile sınırlandırılması gerekmektedir. Halihazırda 1,1 °C'lik bir artış yaşandığından, acil önlemlerin alınmalıdır. Paris Anlaşması'na göre, 2050'ye kadar sera gazı emisyonlarının tamamen azaltılmasını amaçlayan "Net Sıfır Emisyon (NZE)" hedefi belirlenmiştir (International Energy Agency, 2021). Bu hedefe göre, temiz enerji ve emisyonsuz toplum hedeflerine ulaşmak için, mevcut enerji talebinin azaltılmasının yanı sıra artış eğilimi de kontrol altına alınmalıdır. Bu bağlamda, dünya genelinde temiz enerji ve çevre için acil bir ekonomik ve sosyal dönüşüm planının başlatılması gerekmektedir.

İnsanların günlük yaşamlarında önemli bir rol oynayan binalar, içinde yaşadığımız, etkileşimde bulunduğumuz ve çalıştığımız çevreyi oluşturmaktadır. Bu yapılar, temiz enerji kaynaklarına dayalı sürdürülebilir ve dirençli bir topluma geçişte önemli bir etkiye sahiptirler. Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) tarafından hazırlanan bir rapora göre, yapı sektörü küresel enerji talebinin yaklaşık %36'sını oluşturmaktadır (United Nations Environment Programme, 2021). Bu sektör, gerek doğrudan gerekse dolaylı emisyonlar dikkate alındığında enerji kaynaklı CO_2 emisyonlarının %37'sinden sorumludur. Özellikle, hızla gelişmekte olan ülkelerde artan nüfus ve kentleşme göz önüne alındığında, 2050'ye kadar inşa edilecek alanın iki katına çıkması beklenmektedir (Holechek ve diğ., 2022). Ülkelerin çoğunda, yapı sektörü için uygun politika ve kurallar henüz oluşturulmadığından, inşa edilecek yeni binaların, sera gazı emisyonlarının temel kaynağı olması ön görülmektedir. Dolayısıyla, NZE hedeflerine ulaşmak için ana çözümler; (i) zorunlu bina enerji kodlarının uygulanması; (ii) karbonsuzlaştırma stratejilerinin güçlendirilmesi; (iii) cihazların verimliliğinin artırılması; ve (iv) temiz enerjinin teşvik edilmesidir (Global Alliance for Buildings and Construction ve diğ., 2020).

Yapı kabuğu, bir binanın iç ve dış ortamını ayıran, enerji etkinliği, ısıl konfor ve iç mekân kalitesi gibi performans kriterlerini doğrudan etkileyen dış kabuk sistemidir (Xue ve diğ., 2023). Yapı kabuğunun tasarımı, ısıtma ve soğutma enerjisi

gereksinimlerini ve ısıl konforu sağlama, iç ortam kalitesini koruma ve bina sakinlerini dış iklim koşullarından koruma açısından büyük önem taşımaktadır. Yapı kabuğunda yer alan yapı elemanlarının ve bu elemanların tasarımında kullanılan yapı malzemelerinin seçimi, gerek binaların uzun hizmet ömrüne sahip olması, gerekse maliyet etkinliği açısından kritiktir (Christopher ve diğ., 2023).

Duvarlar, çatı ve pencerelerden oluşan yapı kabuğu, binalardaki önemli ısıl enerji kaybı kaynaklarından biridir. Özellikle duvarlar, toplam ısıl enerji kayıplarının yaklaşık %25-30'unu oluşturmaktadır (Abanda ve Byers, 2016). Bu nedenle, dış duvarların ısıl performansını iyileştirmek, enerji verimliliğini artırmak açısından kritik bir rol oynamaktadır. İyi tasarlanmış bir yapı kabuğu, bina enerji tüketimini azaltarak ısıtma ve soğutma yüklerini önemli ölçüde düşürebilir. Bu doğrultuda, yapı kabuğunda kullanılan ve yenilikçi bir çözüm olarak öne çıkan yöntemlerden biri, "ısıl enerji depolama (IED)" sistemlerinin kullanımıdır.

Faz değiştiren malzemeler (FDM), binaların IED sistemlerinde kullanılan nispeten yenilikçi malzemelerdir (Beltran ve Martinez-Gomez, 2019). Yakın geçmişten itibaren binalarda enerji tüketimi ve karbon ayak izini azaltmak için FDM kullanımı yoğun bir şekilde araştırılmaktadır. Bu malzemeler, yüksek ısı depolama kapasiteleri sayesinde gizli ısı enerjisini depolayabilmektedir (Mohseni ve diğ., 2019). Ayrıca, yenilenebilir güneş enerjisinden sürekli yararlanılmasına olanak tanırken, mekanik sistemlerin boyutlarının küçültülmesine ve toplam enerji tüketiminin azaltılmasına katkı sağlar (Chan, 2011). Bu nedenle, yapı kabuğuna FDM entegrasyonu önemli enerji tasarrufları sağlayabilmektedir (Cabeza ve diğ., 2017).

FDM'lerin yapılarda uygulanması 1980'lerden bu yana kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır (Zou ve diğ., 2005). Bu malzemeler binaların duvarlarında, çatısında, tavanda, pencere camında, güneş enerjisiyle ısıtma sisteminde (Chan, 2011), panjur ve kepenklerde, alçı panellerde, yerden ısıtma sistemlerinde, tavan panellerinde veya trombe duvarlarında kullanılabilmektedir. Ayrıca, FDM harç ve betona farklı yöntemlerle eklenerek geleneksel yapı malzemelerinin ısıl performansını geliştirebilmektedir. (Yu ve diğ., 2020). Ancak, FDM uygulanan bölgenin iklim özellikleri, yapının konumu ve yönü, yapı elemanının özellikleri, FDM'nin türü, yapı kabuğundaki konumu, erime ve katılaşma sıcaklığı ve kalınlığı malzemenin

sergileyeceği ısıl performans üzerinde önemli rol oynamaktadır (Alam ve diğ., 2014).

Geleneksel ısı yalıtım malzemeleri (IY) ise, yapı elemanlarının ısı iletim direncini artırmak, yani dışarıya kaçan ısı miktarını azaltmak, amacı ile kullanılan ve ısı iletkenlik katsayısı 0.1 W/mK'den daha düşük olan malzemelerdir. Bu malzemeler, her iki mekân arasındaki sıcaklık farkını azaltarak iç mekandaki duyulur ısıyı korumaktadır (Al-Homoud, 2005). Yapı kabuğunda FDM ve IY kombinasyonu gerek iç mekandaki sıcaklık dalgalanmalarını daha fazla azaltarak ısıl performansını iyileştirmekte gerekse yapı kabuğundan kaynaklı enerji sarfiyatını minimum düzeye indirmektedir (Alizadeh ve Sadrameli, 2019).

Isıl konfor, iç ortam kullanıcılarının memnuniyet düzeyini belirleyen en önemli konfor koşullarından biridir. İç ortamın ısıl konfor koşullarını belirleyen temel parametreler; iç ortam sıcaklığı, iç yüzey sıcaklıkları, iç ortam nemi ve oda içindeki hava akış miktarıdır (Oral ve diğ., 2004). Isıl konforun optimize edilmesi için yapı kabuğunda kullanılan malzemelerin türü, termofiziksel özellikleri, kalınlığı ve konumu dikkate alınmalı, bu unsurların iç ortamdaki sıcaklık dalgalanmaları ve yapının yıllık toplam enerji tüketimi üzerindeki etkileri detaylı şekilde değerlendirilmelidir.

Literatür araştırmaları incelendiğinde, FDM ve IY'nin ideal konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığı gibi parametrelerin ısıl konfor ve enerji verimliliği açısından büyük öneme sahip olduğu görülmektedir. Ancak, özellikle Türkiye gibi farklı iklim koşullarının aynı zamanda bir arada yaşandığı bir coğrafyada ideal yapı kabuğu tasarımına yönelik araştırmaların sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Ülkemizde, TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Yönetmeliği (TS 825, 2024) ile belirlenmiş beş farklı iklim bölgesi bulunmaktadır. Yapı kabuğunun karşılaması gereken ısıl performans ölçütleri bu iklim bölgelerine göre değiştiğinden, tüm iklim bölgeleri için aynı kalınlıkta ve aynı konumda malzeme kullanılması, duvar kesitinin ısıl performansını olumsuz etkileyebilir ve kullanıcı sağlığını riske atabilir. Bu bağlamda, bu yüksek lisans tezinin amacı, FDM ve IY'nin aynı yapı kabuğunda birlikte kullanıldığı eğitim binasının ülkemizin beş farklı iklim bölgesi için ısıl ve enerji performansı açısından değerlendirilmesidir. Söz konusu değerlendirme ile TS 825 tarafından belirlenen ısıl performans kriterlerine uygun, yoğuşmaya imkân vermeyen, kullanıcı sağlığı üzerinde herhangi bir olumsuz etkiye yol açmayan yapı kabuğu tasarımı amaçlanmaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Kapsam

Türkiye'nin sıcak-nemli, sıcak-kuru, ılımlı-nemli, ılımlı-kuru ve soğuk iklim bölgelerinin her birinde yaz ve kış dönemleri için ideal yapı kabuğunun saptanması çalışma kapsamı içerisinde yer almaktadır. Yapı kabuğu bileşeni olarak "dış iklim koşullarına açık dış duvar" elemanı tez kapsamında yer almakta, bir diğer yapı kabuğu bileşeni olan çatı ise tez kapsamına dahil edilmemiştir. Bu bağlamda, FDM ve IY kombinasyonları ile tasarlanan farklı dış duvar kesitlerinin; (i) ısıl konfor düzeyinin belirlenmesi; (ii) iç ortam sıcaklık dalgalanmalarını azaltmadaki (SDA) başarısının belirlenmesi; (iii) ısıtma ve soğutma dönemlerindeki enerji tasarrufunun belirlenmesi; (iv) ekonomik optimizasyonun yapılması tez kapsamına alınmıştır. FDM ve IY'nin duvar kesiti içerisindeki konumunun, kalınlıklarının ve FDM'nin erime sıcaklıklarının etkinliği alt parametreler olarak tanımlanmış ve tezin amacına ulaşılması için simülasyon yöntemi kullanılmıştır.

Eğitim yapıları, kullanıcı yoğunluğu, gün içi kullanım sürelerinin uzunluğu, farklı yaş gruplarına hitap eden iç mekân konfor gereksinimleri ve toplumsal işlevleri açısından diğer bina türlerinden ayrışmaktadır. Bu tür yapılarda iç ortam konforunun sürekliliği, kullanıcı sağlığı ve verimliliği açısından kritik öneme sahiptir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, ısıl konfor ve enerji verimliliği odaklı yapı kabuğu optimizasyonlarının ağırlıklı olarak konut ve ofis yapıları üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, eğitim yapılarının farklı kullanıcı profilleri, yoğun ve sürekli kullanım karakteristiği ile kamusal işlevlerine rağmen, araştırma eksikliği yaşanan bir alan olarak öne çıkmasına neden olmaktadır. Bu bağlamda, eğitim yapıları hem akademik hem de uygulamaya yönelik olarak değerlendirilmesi gereken önemli bir yapı türü olarak ele alınmıştır.

2.2. Yaygın Etki

Bu yüksek lisans tezinin başarıyla tamamlanması halinde, FDM ve IY entegrasyonunun yapı kabuğunun ısıl ve enerji performansına olan etkileri bilimsel olarak Türkiye ölçeğinde ortaya konması ve enerji verimli bina tasarımına yönelik literatüre önemli

katkılar sağlaması beklenmektedir. FDM ve IY'nin yapı kabuğu içerisindeki en uygun konumu, kalınlığı ve FDM'nin erime sıcaklığı gibi parametrelerin belirlenmesi, bina ısıtma ve soğutma yüklerini azaltarak enerji tasarrufu sağlanmasına olanak tanıyabilecektir. Bu sayede, yapı kabuğu kaynaklı enerji kayıplarının azaltılmasına ve ülke genelinde binalardan kaynaklanan karbon salımının düşürülmesine katkı sağlanabilecektir.

Tezin başarılı olarak sonuçlanmasıyla, Türkiye'de enerji tasarrufunu artıran ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlayan yapı tasarımları için önemli bir veri seti sunulması öngörülmektedir. Eğitim yapıları özelinde yürütülen bu çalışma, sürdürülebilir mimarlık ve enerji verimliliği ilkeleri doğrultusunda yenilikçi malzeme uygulamalarının ne ölçüde katkı sağlayabileceğini somut verilerle ortaya koyarak, bu alandaki bilimsel boşluğun giderilmesine katkıda bulunacaktır. Tezin sonucunda elde edilen bulgular, yalnızca akademik literatüre değil, aynı zamanda eğitim yapılarının tasarımı ve iyileştirilmesine yönelik uygulamalara da yön verecek nitelikte olacaktır. Böylece, özellikle kamuya ait eğitim binalarında enerji tasarrufu potansiyelinin değerlendirilmesi açısından önem arz etmektedir. Bu kapsamda, çalışmanın sonuçları bina enerji verimliliği alanında önerilecek yasal düzenlemeler ve standartlar için de bir temel teşkil edebilir.

2.3. Yöntem

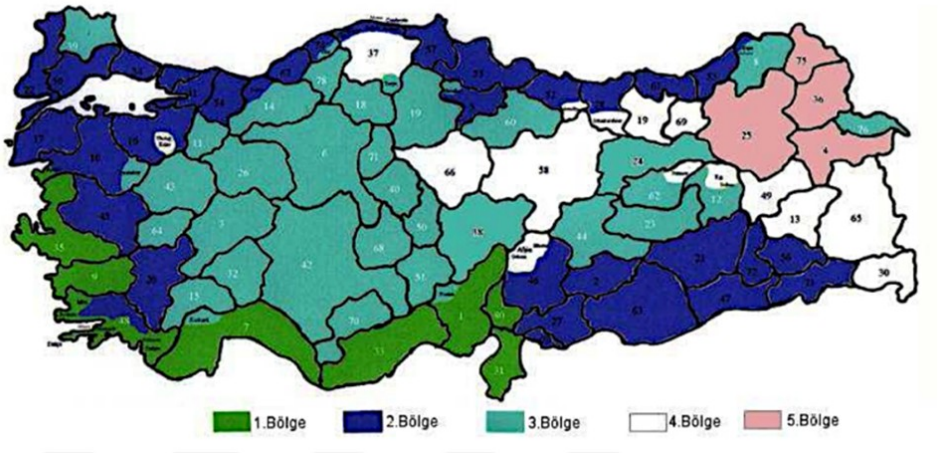
FDM ve IY'nin binalarda sağladığı ısıl konfor ve enerji verimliliği ile ilgili Türkiye ölçeğinde belirlenen literatür eksikliğini gidermek üzere detaylı literatür taraması yapılmıştır. Literatür taraması yapılırken özellikle SCI, SCI-E, AHCI gibi uluslararası anlamda akademik etki faktörü yüksek makalelerin analiz ve sentezine önem gösterilmiştir. Literatür araştırması sonucunda çalışma için en uygun yöntemin simülasyon yöntemi olduğu saptanmıştır. FDM esaslı araştırmalarda malzemenin faz dönüşüm sürecini tam olarak saptamak için "Sonlu Farklar Hesaplama Yöntemi"ni temel alan DesignBuilder® yazılımı kullanılmıştır. Öncelikle eğitim binası modellenmiştir. Farklı yerleşim ve malzeme kombinasyonlarını içeren dört farklı duvar kesiti tanımlanmış, bu kapsamda hem referans (FDM ve IY içermeyen) hem de çeşitli FDM ve IY konfigürasyonlarına sahip örnekler değerlendirilmiştir ve Türkiye'nin beş farklı iklim bölgesi için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, FDM'nin yapı

kabuğu içerisindeki konumu ile birlikte IY ile birlikte kullanım durumları ele alınarak, malzemelerin birlikte veya ayrı ayrı farklı katmanlara yerleştirilmesinin performansa etkileri araştırılmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, malzeme dağılımının ve konumlandırmasının yapı kabuğunun enerji etkinliği üzerindeki belirleyici rolü ortaya konulmuştur. Elde edilen bulgular ısıl konfor, enerji tasarrufu ve ekonomiklik kriterleri bağlamında her bir iklim bölgesi için gerek yaz gerekse kış mevsimi koşullarında ayrı ayrı irdelenerek ideal duvar kesitleri belirlenmiştir.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1. Türkiye'nin İklim Bölgeleri

Ülkemiz özelinde yapılı çevre ile iklim verileri göz önüne alındığında iklim bölgeleri: sıcak nemli (1. bölge), sıcak kuru (2. bölge), ılımlı nemli (3. bölge), ılımlı kuru (4. bölge) ve soğuk (5. bölge) iklim bölgesi olarak sınıflandırılmaktadır (TS 825, 2024). TS 825'e göre ülkemizdeki bu iklim bölgelerinin özelliklerini temsil eden iller Şekil 3.1.'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Derece gün bölgelerine göre iller (TS 825, 2024)

3.1.1. Sıcak Nemli İklim Bölgesi

Sıcak nemli iklimin en belirgin özellikleri arasında yoğun yağış, yüksek nem oranı ve sıcaklık öne çıkmaktadır. Yaz ve kış ayları arasındaki sıcaklık farkı oldukça düşük; kış aylarında ise yağış miktarı yüksektir. Bölgedeki hâkim rüzgarlar ve deniz-kara arasındaki hava akımları konfor koşullarını sağlama bakımından olumludur. Akdeniz Bölgesi'nin kıyı bölgeleri ile Ege Bölgesi'nin sahil kısımlarında etkisini göstermektedir. Bu bölgede yer alan illerin rakımları 2 ile 150 m arasında değişkenlik göstermektedir (Dizdar, 2009). Yerleşim alanları genellikle kıyı ovalarında yoğunlaşmıştır ve denizden esen meltem rüzgârı, özellikle yaz aylarında serinletici bir etki yaratmaktadır. Ege Bölgesi'nin kıyıları ile Akdeniz Bölgesi'nin batı sahillerindeki dağlar, denize dik olarak uzanmakta, bu da yamaç karakteri veya falez benzeri arazi şekillerine yol açmaktadır. Bölgedeki yeşil örtü, büyük ölçüde kızılçam ormanları ve makilerden oluşmaktadır (Şensoy ve diğ., 2005).

Sıcak nemli iklim bölgesi illeri; Adana, Antalya, Hatay, İzmir ve Mersin'dir (TS 825, 2024).

3.1.2. Sıcak Kuru İklim Bölgesi

Sıcak kuru iklimde yazlar aşırı sıcak ve kurudur. Yaz aylarında sıcaklık ortalaması yaklaşık 40 ºC'dir. Kışlar ise soğuk geçmektedir. Yıllık ortalama sıcaklık 16,4 ºC iken, nispi nem oranı yaklaşık %53,6'dir. Yaz-kış arasındaki ışınım farkı ve gece-gündüz sıcaklık farkı oldukça yüksektir. Yaz aylarında yağış görülmezken, bulutluluk oranı düşer ve nem oranı azalır. Yılın bazı dönemlerinde kuru ve şiddetli rüzgarlar etkili olmaktadır (Dizdar, 2009). Bu iklim bölgesinde yer alan illerin rakımları 500 ile 1000 m arasında değişmektedir. Topografya genellikle düz ve az engebelidir. Yeşil örtü ise düşük rakımlı düzlüklerde cılız bozkırlar ve kuraklığa dayanıklı çalılardan oluşmaktadır (Şensoy ve diğ., 2005).

Sıcak kuru iklim bölgesi illeri; Aydın, Ayvalık (Balıkesir), Adıyaman, Amasya, Balıkesir, Bartın, Batman, Bursa, Çanakkale, Denizli, Diyarbakır, Düzce, Edirne, Gaziantep, Giresun, İstanbul, Kahramanmaraş, Kilis, Kocaeli, Manisa, Mardin, Muğla, Osmaniye, Ordu, Rize, Samsun, Sakarya, Siirt, Sinop, Şırnak, Şanlıurfa, Tekirdağ, Trabzon, Yalova ve Zonguldak'tır (TS 825, 2024).

3.1.3. Ilımlı Nemli İklim Bölgesi

Ilımlı nemli iklimde yazlar ılıman, kışlar ise hafif soğuk bir karakter sergilemektedir. Şiddetli kışlar ve aşırı sıcak yazlar nadiren görülmektedir. Yaz ve kış arasındaki sıcaklık farkı genellikle düşüktür, bu da insan konforu açısından ideal bir iklim koşulu yaratır. Ancak, yükseklik ve deniz kenarındaki konum farklılıklarına bağlı olarak yaz ve kış aylarında küçük veya büyük sıcaklık farkları oluşabilmektedir. Yağışlar yıl içinde dengeli bir şekilde dağılmakta olup, özellikle Ocak, Şubat ve Haziran aylarında yoğunlaşır. En sıcak aylar Temmuz, Ağustos ve Eylül'dür. İklimin en belirgin özelliği, yüksek yağış miktarı ve nem oranıdır. Marmara Bölgesi ile Doğu ve Batı Karadeniz'in kıyı kesimlerinde etkisini göstermektedir ve bu bölgede yer alan illerin rakımları 3 ile 600 m arasında değişmektedir (Dizdar, 2009). Topografik yapı, coğrafi bölgelere göre farklılık gösterir; Marmara Bölgesi genellikle ova iken, Karadeniz Bölgesi'nin kıyı

kesimleri yamaçlı bir yapıdadır. Yeşil örtü, Trakya'nın batısında kuru, kuzeyinde nemli ormanlar, Marmara Bölgesi'nin alçak kesimlerinde Akdeniz kökenli bitkiler, yüksek kesimlerinde ise nemli ormanlarla çeşitlenirken, Karadeniz kıyılarında geniş yapraklı nemli ormanlar bulunur (Şensoy ve diğ., 2005).

Ilımlı nemli iklim bölgesi illeri; Afyonkarahisar, Aksaray, Ankara, Artvin, Bilecik, Bingöl, Bolu, Burdur, Çankırı, Çorum, Elazığ, Eskişehir, Iğdır, Isparta, Karabük, Karaman, Kırıkkale, Kırklareli, Kırşehir, Konya, Kütahya, Malatya, Nevşehir, Niğde, Tokat, Tunceli ve Uşak'tır (TS 825, 2024).

3.1.4. Ilımlı Kuru İklim Bölgesi

Ilımlı kuru iklimde gece ve gündüz arasındaki sıcaklık farkı oldukça yüksektir ve bu durum, soğuk iklim koşullarına yakın özellikler sergileyen bir iklim yapısına yol açmaktadır. Ortalama dış sıcaklıklar -5 ºC ile 30 ºC arasında değişmektedir. Bu durum, yaz aylarında denizin serinletici, kış aylarında ise ılımanlaştırıcı etkisini engelleyen dağların varlığından kaynaklanmaktadır (Dizdar, 2009). Yazın sıcaklık ortalaması 27-37 ºC arasındadır. Kışın ise sıcaklık ortalaması 8-15 ºC arasında değişmektedir. İç Anadolu Bölgesi, Ege Bölgesi'nin doğu kısımları, Akdeniz Bölgesi'nin kuzey kısımları ve Karadeniz Bölgesi'nin güney kısımlarında etkisini göstermektedir ve bu bölgede yer alan illerin rakımları 700-1200 m arasında değişmektedir. İç Anadolu Bölgesi genel olarak ova yapısına sahip olup, yer yer engebelidir. Diğer bölgeler ise kısmen dağlık ve engebeli bir yapıya sahiptir (Şensoy ve diğ., 2005).

Ilımlı kuru iklim bölgesi illeri; Bayburt, Bitlis, Erzincan, Gümüşhane, Kastamonu, Kayseri, Muş, Hakkâri, Yozgat, Sivas ve Van'dır (TS 825, 2024).

3.1.5. Soğuk İklim Bölgesi

Uzun ve sert kışların hâkim olduğu soğuk iklimde, yılın neredeyse yarısında sıcaklık 0 ºC'nin altındadır. En düşük ortalama sıcaklık yaklaşık -20 ºC'dir. Yağışlar, yaz aylarında yağmur, kış aylarında ise kar şeklinde gerçekleşmektedir. Kar yağışları genellikle Ekim ayında başlar ve Mayıs ayının ortalarına kadar devam eder. Buna karşın, yazlar kısa ve serin geçer. Yağmur miktarı düşük olup, bağıl nem oranı da azdır. Zorlu iklim koşulları, rüzgarların etkisiyle daha da sertleşmektedir (Dizdar, 2009). Bu

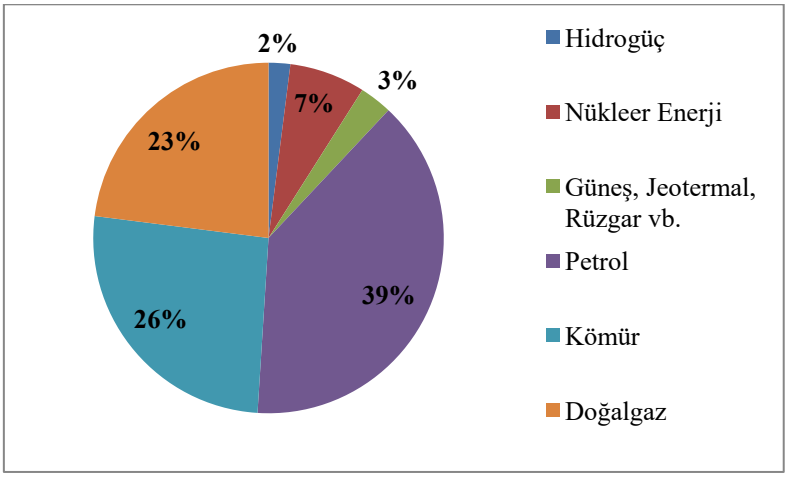
iklim özellikleri, Doğu Anadolu Bölgesi, İç Anadolu Bölgesi'nin doğu kısmı ve Doğu Karadeniz Bölgesi'nin güneyini kapsayan yerleşimlerde görülmektedir. Bu bölgelerdeki rakımlar 700-2000 m arasında değişmektedir. Bölge, genel olarak dağlık bir yapıya sahip olup, arazisi engebelidir (Şensoy ve diğ., 2005).

Soğuk iklim bölgesi illeri; Ağrı, Ardahan, Erzurum ve Kars'tır (TS 825, 2024).

Farklı iklim koşulları, binaların enerji ihtiyacını ve enerji tüketim dinamiklerini doğrudan etkilediğinden, gerek ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarını dengelemek gerekse enerji arz-talep dengesini optimize etmek için enerji depolama sistemleri (EDS) önemli bir unsur haline gelmiştir.

3.2. Enerji Depolama Sistemleri

Günümüzde dünya genelinde artan enerji ihtiyacını karşılamak için çoğunlukla doğalgaz, petrol ve kömür gibi fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Şekil 3.2.'de, fosil yakıtların dünya genelindeki toplam enerji tüketimi verilmiştir. Ancak, bu yenilenemeyen enerji kaynaklarının rezervleri, küresel ölçekte hızla azalmaktadır. Fosil yakıtların kullanımı, sera gazı emisyonlarının artmasına ve küresel ısınmanın hızlanmasına yol açarak çevresel açıdan ciddi sonuçlar doğurmaktadır. Bu olumsuz etkilerin önüne geçebilmek için enerji üretiminde yenilenebilir kaynakların payının artırılması büyük önem taşımaktadır (Hadjipaschalis ve diğ., 2009). Bu bağlamda, alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesi kadar, EDS kullanımının yaygınlaştırılması da kritik bir öneme sahiptir.



Şekil 3.2. Fosil yakıtların toplam enerji tüketimi (Shumeli ve diğ., 2010)

EDS'nde, kullanım sürecinde açığa çıkan atık enerjinin depolanması ve yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin etkin bir şekilde depolanması hedeflenmektedir (Sharma ve diğ, 2009).

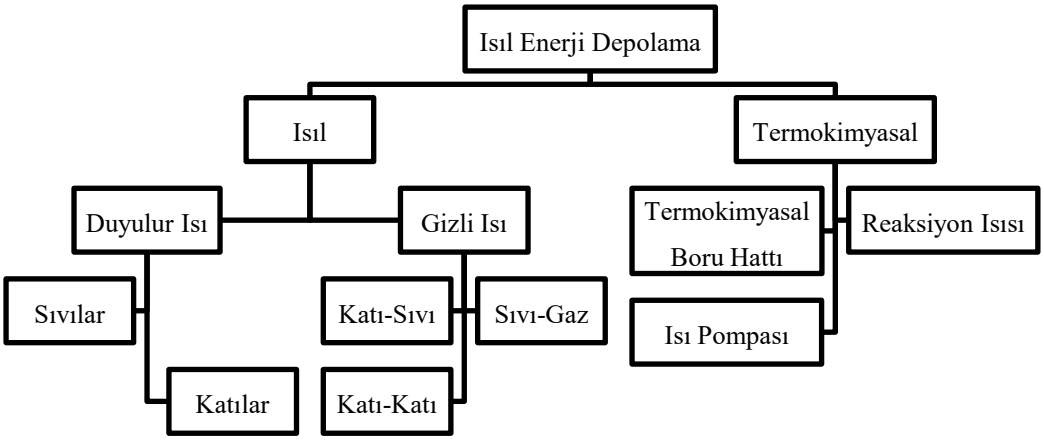
Enerjinin etkin ve verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamak ve enerji tasarrufu elde etmek amacıyla kullanılan başlıca depolama sistemleri 4'e ayrılmaktadır:

- Mekanik enerji depolama
- Kimyasal enerji depolama
- Elektriksel enerji depolama
- Isıl enerji depolama (IED) (Kozak ve Kozak, 2012).

Bu tezin amacına yönelik olarak bu bölümde yalnızca IED sistemleri açıklanmaktadır.

3.2.1. Isıl Enerji Depolama Sistemleri

Bir maddenin faz değişimi sırasında çevreden aldığı veya çevreye saldığı enerji, ısıl enerji olarak tanımlanmaktadır. Faz değişimi süresince, sabit sıcaklıkta iç enerjideki artış nedeniyle madde ısı enerjisi depolar (Fleischer, 2015). Isı enerjisi, duyulur ısı, gizli ısı, tepkime ısısı veya bu unsurların birleşimi şeklinde depolanabilmektedir (Şekil 3.3.) (Sharma ve diğ., 2009).



Şekil 3.3. Isıl enerji depolama sistemlerinin sınıflandırılması (Sharma ve diğ., 2009)

Duyulur ısı depolama, malzemenin özgül ısısına bağlı olarak sıcaklığının artması

veya azalmasıyla gerçekleşmektedir. Gizli ısı depolama, bir maddenin faz değişimi sırasında ısıyı depolaması prensibine dayanmaktadır. Termokimyasal ısı depolama ise, malzemenin kimyasal reaksiyonları sırasında enerji kazanması veya kaybetmesi yoluyla gerçekleşmektedir (Çırakman, 2010).

3.2.1.1. Duyulur Isı Depolama

Duyulur ısı, bir maddenin sıcaklığını değiştirmek için gerekli olan, ancak ergime veya buharlaşma gibi faz değişimlerinin gerçekleşmediği durumlarda ortaya çıkan ısı miktarıdır. Bu süreç, maddenin sıcaklığını değiştirirken fiziksel halini etkilemez (Konuklu ve Paksoy, 2011).

Duyulur ısı depolama malzemeleri, (kum-kaya-petrol, dökme demir, çelik döküm, sentetik yağ, nitrit tuzları, sıvı sodyum vb.) genellikle kolay erişilebilir ve düşük maliyetlidir. Bu sistemlerin başlıca avantajları arasında, yüksek ısıl kapasiteye sahip olmaları, uzun süre (10-15 yıl) performanslarını koruyabilmeleri, korozif olmamaları, kolay temin edilebilmeleri ve ekonomik olmaları yer almaktadır (Okcu, 2011).

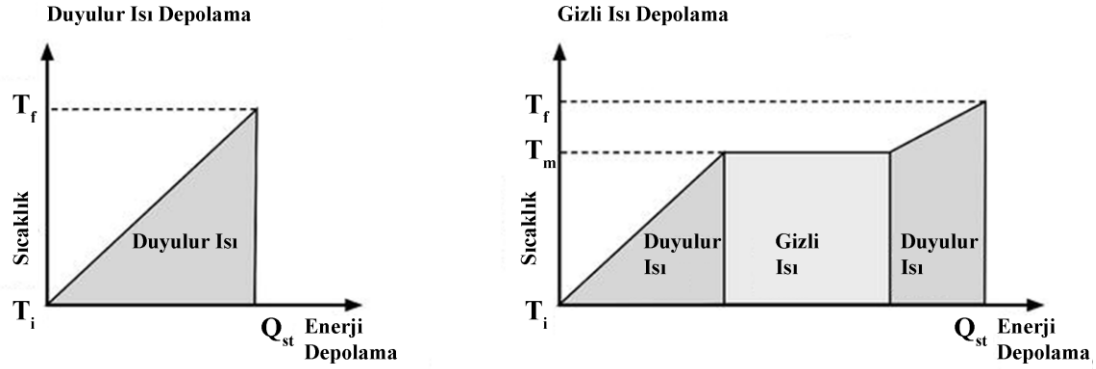
3.2.1.2. Gizli Isı Depolama

Gizli ısı, bir maddenin faz değişimi sırasında çevreden aldığı veya çevreye verdiği ısı olarak tanımlanabilir (Konuklu, 2008). Belirli sıcaklıklarda faz değişimi gerçekleştiren ve bu süreçte ısı depolayabilen maddeler, ısı depolama amacıyla kullanılmaktadır. Bu yöntem, yüksek ısı depolama kapasitesine sahip olması ve faz değişim sıcaklığının sabit bir sıcaklıkta enerji depolamaya uygunluğu nedeniyle, diğer ısı depolama yöntemlerine kıyasla daha fazla tercih edilmektedir (Okcu, 2011).

Gizli ısı enerjisinin depolanması amacıyla kullanılan ve sabit bir faz değişim sıcaklığında çevreden ısı enerjisini soğurup serbest bırakarak ısı stabilizasyonu sağlayan malzemeler, faz değiştiren malzeme (FDM) olarak tanımlanmaktadır. Bu tür malzemeler, aynı zamanda "gizli ısı depolayıcı malzemeler" olarak da adlandırılmaktadır (Yılmaz, 2005a).

Gizli ısı depolama, katı-sıvı, sıvı-gaz, katı-gaz ve katı-katı faz dönüşümleriyle gerçekleştirilebilir. Ancak uygulamada genellikle katı-sıvı ve katı-katı faz dönüşümleri

tercih edilmektedir. Katı-gaz ve sıvı-gaz faz geçişleri, daha yüksek bir gizli füzyon ısısına sahip olmalarına rağmen, faz değişimi sırasında meydana gelen büyük hacim değişiklikleri kapsülleme sorunlarına neden olmakta ve bu durum, ısıl depolama sistemlerinde uygulanabilirliği zorlaştırmaktadır (Konstantinidou, 2010). Gizli ısı depolama yöntemlerinde, duyulur ısı depolamaya nazaran çok daha küçük bir depo hacmi yeterli olurken, depolama kapasitesi ise oldukça yüksektir (Öztürk, 2007). Yani FDM'ler, daha düşük sıcaklık ve hacim değişimi ile daha fazla ısı depolayarak duyulur ısı depolama yöntemlerine göre daha yüksek verimlilik sağlamaktadır (Günerhan, 2004). Şekil 3.4.'te duyulur ve faz değişimi olmadan duyulur ısıyı kullanan (Duyulur Isı Depolama) ve duyulur ısı ve faz değişimini bir arada kullanan (Gizli Isı Depolama) grafikler belirtilmiştir. Burada T_i ve T_f, enerji depolama sürecinin başlangıç ve bitiş sıcaklıklarını ifade ederken, T_m, gizli ısı depolama durumunda FDM'nin erime sıcaklığını belirtmektedir (Panão, 2020).



Şekil 3.4. Duyulur ve gizli ısı depolama (Panão, 2020)

3.2.1.3. Termokimyasal Enerji Depolama

Kimyasal reaksiyonlar sırasında açığa çıkan ısı, kimyasal ısı olarak adlandırılmaktadır. Bir kimyasal bağın kırılması ve oluşması sürecinde ortaya çıkan ısı enerjisinin depolanmasına ise termokimyasal enerji depolama denir (Yılmaz, 2005b). Kimyasal bağların tersine çevrilebilir şekilde ayrışması ve birleşmesi sırasında, yüksek ısı değeri taşıyan kimyasal reaksiyonlar gerçekleşir, bu nedenle ısı depolama kapasitesi genellikle yüksektir (Örengül, 2010). Düşük sıcaklık uygulamaları için kimyasal reaksiyonlarla ısı depolama konusunda önemli ilerlemeler kaydedilmiş olsa da, pratikte karşılaşılan zorluklar, termokimyasal ısı depolama yöntemlerinin yaygın kullanımını sınırlamaktadır

(Yılmaz, 2005a).

3.3. Gizli Isı Depolama Sistemlerinde Kullanılan Faz Değiştiren Malzemeler

3.3.1. Faz Değiştiren Malzemelerin Tanımı ve Özellikleri

Gizli ısı depolama sistemlerinde yaygın olarak kullanılan FDM'ler uygulandıkları yapı bileşen/elemanlarının termal kütlesini artıran yenilikçi malzemelerdir (Omara ve Abuelnuor, 2019). Nispeten kısıtlı bir sıcaklık aralığında yüksek miktarda enerji depolayabilme kapasitesine sahip olan bu malzemeler, geleneksel yapı malzemeleriyle (beton, taş vb.) kıyaslandığında daha düşük yoğunluklu olmalarına rağmen, birim hacim başına depolanan ısı miktarı bakımından geleneksel malzemelerden yaklaşık 15 kat daha verimlidir.

FDM'ler, tekstil, gıda, medikal ve otomotiv gibi çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmakta olup, bina sektöründe de önemli bir uygulama alanına sahiptir. Binalarda enerji tüketimini doğrudan etkileyerek ısıtma ve soğutma yüklerini azaltmada yenilikçi bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Etkili IED ve geri salım mekanizması sayesinde, FDM kullanımıyla binanın enerji talebinde kayda değer bir düşüş sağlanabilmektedir (Seong ve Lim, 2013).

FDM'lerin bina uygulamalarında kullanımı, ilk olarak 1970 yılında tuz hidratlarının bir yapıda uygulanmasıyla başlamıştır (Konuklu ve Paksoy, 2011). Bina sistemlerinde etkin bir şekilde kullanılabilmesi için FDM'lerin yüksek gizli ısı depolama kapasitesine, yüksek ısıl iletkenliğe, yüksek özgül ısı kapasitesine ve minimum hacim değişimine sahip olması gerekmektedir (Dinçer ve Rosen, 2002).

3.3.2. Faz Değiştiren Malzemelerin Sınıflandırılması

FDM'ler organik, inorganik ve ötektik olarak sınıflandırılmaktadır (Mazman, 2006).

3.3.2.1. Organik Faz Değiştiren Malzemeler

Organik FDM'ler; parafin mumları, esterler, asitler ve alkollerden oluşmaktadır (Bruno ve diğ., 2014). Bu malzemeler, parafin ve parafin içermeyen organik bileşikler olarak iki ana gruba ayrılabilir. Parafin içermeyen türler arasında yağ asitleri ve polietilen

glikol (PEG) gibi bileşikler yer almaktadır (Mert ve diğ., 2018). Organik FDM'lerin bir IED sistemlerinde kullanılabilmesi için genellikle uygun yöntemlerle kapsüllenmesi gerekmektedir (Bruno ve diğ., 2014).

Parafin olmayan organik bileşikler, parafinler gibi homojen bir yapıya sahip olmayıp, birbirinden farklı fiziksel özellikler sergilemektedir. Bu bileşikler, geniş bir kimyasal çeşitliliğe sahip heterojen bir grup oluşturmaktadır (Mert ve diğ., 2018). Bu malzemeler; yağ asitleri, alkoller ve glikoller olmak üzere alt gruplara ayrılmaktadır. Yanıcı özellikte olduklarından dolayı, yüksek sıcaklıklara, alevlere veya oksitleyici maddelere maruz bırakılmamaları gerekmektedir (Sharma ve diğ., 2009).

3.3.2.2. İnorganik Faz Değiştiren Malzemeler

İnorganik FDM'ler, dört ana gruba ayrılmaktadır: tuzlar, tuz hidratları, metaller ve alaşımlar. Tuz hidratlara, sodyum asetat trihidrat, kalsiyum klorür hekzahidrat, sodyum sülfat dekahidrat, sodyum tiyosülfat pentahidrat ve baryum hidroksit oktahidrat gibi bileşikler örnek olarak verilebilir. Bu tür tuz hidratları, düşük maliyetli olmaları nedeniyle özellikle araştırma ve geliştirme çalışmalarında tercih edilmektedir (Verma ve Singal, 2008).

Yüksek füzyon ısısına sahip inorganik bileşiklerin ısıl iletkenlikleri genellikle yüksek düzeydedir (Baetens ve diğ., 2010). Ancak, birçok tuz hidratında erime uyumsuzluğu gibi sorunlar meydana gelebilmektedir (Sharma ve diğ., 2009).

3.3.2.3. Ötektik Karışımlar

Ötektik karışımlar, en az iki farklı atom veya molekülün birleşimiyle meydana gelmektedir. Bu malzemeler, sabit bir sıcaklıkta katılaşırken bir reaksiyon geçirir ve bu süreçte sıvı haldeki malzeme, iki ayrı katı faza dönüşür. Organik-organik, organik-inorganik ve inorganik-inorganik olarak iki veya daha fazla bileşiğin karışımı ile oluşurlar (Mert ve diğ., 2018).

3.3.3. Faz Değiştiren Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

Tablo 3.1.'de farklı türdeki FDM'lerin avantaj ve dezavantajları verilmiştir. Buna göre, FDM'nin uygulanacağı yapı bileşen/elemanlarının kullanım amacı ve bu elemanlardan

beklenen performans kriterlerinin yanı sıra aşağıda bahsedilen avantaj ve dezavantajlar göz önünde bulundurularak uygun FDM türü seçilmelidir.

Tablo 3.1. FDM'lerin avantaj ve dezavantajları (Koşan, 2018)

FDM Türü	Avantajlar	Dezavantajlar
Organik	• İyi ısıl kararlılık • Aşırı soğuma olmadan donma • Düşük buhar basıncı • Özgün çekirdekleşme özelliği • Uyumlu eriyebilme • Düşük hacim değişikliği • Geleneksel yapı malzemeleri ile uyumluluk • Geniş çalışma sıcaklığı	• Sıvı FDM'nin sızması • Düşük termal iletkenlik • Yanıcılık
İnorganik	• Yüksek hacimli gizli depolama kapasitesi • Yangına karşı dayanımlı • Düzgün faz değişimi • Yüksek termal ısıl iletkenlik	• Aşırı soğumaya eğilimli • Ayrışma • Uyumlu eriyememe • Yüksek hacim değişiklikleri • Metal ile korozif olma • Tekrarlanan fazlarda faz ayrılma
Ötektik	• Keskin, net erime noktaları • Özellikler isteğe bağlı değişebilir	• Yüksek maliyetli • Termofiziksel özellikleri sınırlı

3.3.4. Faz Değiştiren Malzemelerin Hazırlanma Yöntemleri

FDM'ler, genellikle daldırma, doğrudan birleştirme, kapsülleme ve şekil stabilleştirme yöntemleri ile yapı bileşen/elemanlarının üretiminde kullanılmaktadır. Alternatif olarak, FDM'ler şilte, kapsül, levha gibi farklı şekillerde üretilip, diğer bina malzemeleriyle birlikte de uygulanmaktadır (Tokuç, 2013).

3.3.4.1. Daldırma Yöntemi

Daldırma yöntemi, sıvı fazdaki FDM'lerin yapı malzemelerine füzyon yöntemiyle daldırılıp çıkarılması işlemine dayanmaktadır. Alçıpan, tuğla gibi gözenekli malzemelerin içyapılarında kapiler yollarla depolanan FDM, soğuduktan sonra etkin bir şekilde kullanılabilmektedir. Uygulama açısından ucuz ve kolay bir yöntem olmasına rağmen, en önemli dezavantajı akma veya sızıntı sorunlarıyla karşılaşılabilmesidir.

Ancak, bu yöntemin en büyük avantajı, standart yapı elemanlarının ihtiyaç duyulduğunda FDM içeren elemanlara dönüştürülebilmesi ve daldırma işleminin her ortamda ve her zaman gerçekleştirilebilmesidir (Tokuç, 2013).

3.3.4.2. Doğrudan Birleştirme Yöntemi

Yapı malzemesi üretim sürecinde, sıvı veya toz formundaki FDM'ler, doğrudan yapı malzemeleriyle karıştırılabilir. Bu yöntem, düşük donanım gereksinimi nedeniyle ekonomik açıdan avantaj sağlar ancak düzgün dağılımın sağlanamaması ve FDM'nin erime fazında malzemeden dışarı sızması gibi zorluklar da bulunmaktadır. Bu yöntemle elde edilen malzemelerde, en önemli sorunlardan biri sızıntı veya diğer malzemelerle uyumsuzluk yaşanabilmesidir (Zhou ve diğ, 2012). Şekil 3.5.'te FDM'nin doğrudan birleştirme yöntemi ile test duvarında uygulanması gösterilmiştir.

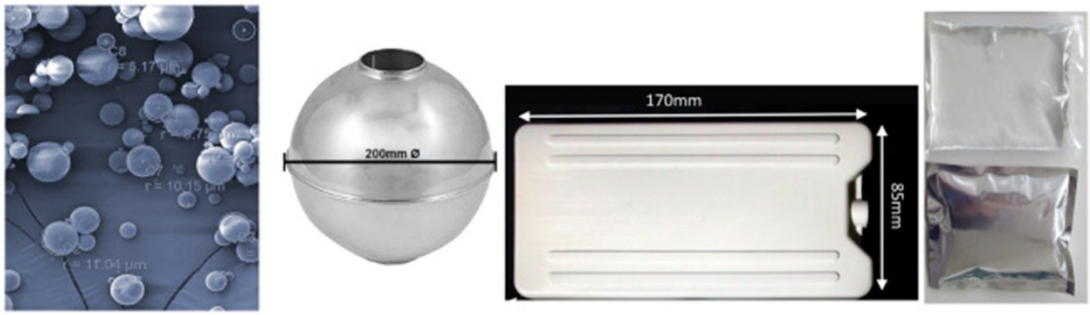


Şekil 3.5. FDM'nin doğrudan birleştirme yöntemi ile test duvarında uygulanması (Kośny, 2015)

3.3.4.3. Kapsülleme Yöntemi

Yapı malzemelerine FDM eklemek, olumsuz etkilerden kaçınmak için FDM'leri birleştirme işlemi öncesinde kapsülleme yöntemine başvurulabilir. FDM'lerin kapsüllenmesinde en yaygın iki teknik makrokapsülleme ve mikrokapsüllemedir. Makrokapsülleme yönteminde, FDM'ler tüp, torba, küre, panel gibi kapsüllere yerleştirilip, ardından yapı malzemesi ile birleştirilir. Makrokapsüllerin dış etkilere karşı korunması gerektiği için bu yöntemin maliyeti daha yüksektir. Diğer bir sorun ise, sıvı haldeki FDM'lerin ısı alması gerektiğinde, katılaşma sürecinin başlangıcında malzemenin dış yüzeyinin donarak ısı iletim verimliliğini azaltmasıdır.

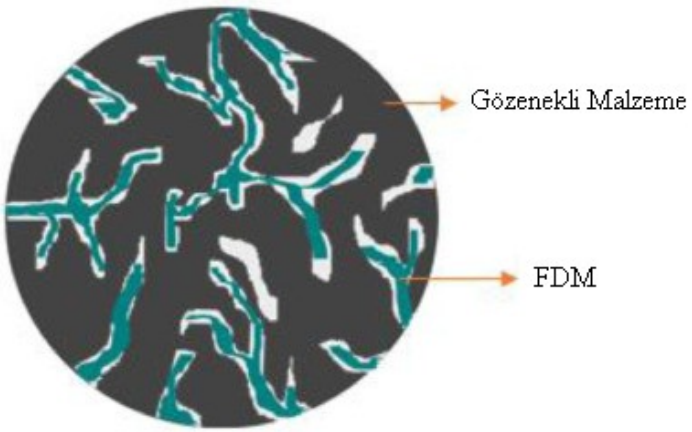
Mikrokapsülleme ise; ısı akışı yüzeyinin artması, FDM'lerin dış ortam koşulları ile etkileşiminin azalması ve malzemenin faz değişimi sırasındaki hacim değişiminin kontrol edilmesi olanaklıdır (Khudhair ve Farid, 2004). Şekil 3.6.'da kapsülleme yöntemi ile oluşturulan çeşitli yapı elemanları gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Kapsülleme örnekleri (URL-1; URL-2)

3.3.4.4. Şekil Stabilleştirme Yöntemi

Şekil stabilleştirilmiş FDM, sıvı formdaki FDM'nin genellikle yüksek yoğunluklu polietilen ya da stiren-bütadien-stiren gibi polimerik malzemelere eklenmesi ile hazırlanmaktadır (Şekil 3.7.). Eklenen malzemesinin türüne bağlı olarak karışım oranları farklılık gösterebilir. Bu polimerik malzemeler kütlece %80'e varan oranlarda FDM ile ikame edilebilmektedir. Bu yöntemle üretilen malzemeler makro ölçekte homojen bir malzeme görüntüsü kazanmaktadır (Kuznik ve diğ, 2011). Ayrıca kapsüllemeye kıyasla daha ekonomik olup, işlem adımlarının sayısını da azaltmaktadır (Ramirez ve diğ., 2020).



Şekil 3.7. Şekil stabilleştirilmiş FDM gösterimi (Ramirez ve diğ., 2020)

3.3.5. Mimari Tasarımda Faz Değiştiren Malzeme Kullanımı

Mimari tasarımda FDM kullanımına yönelik ilk çabalar 1980'lere dayanmaktadır. 2000'li yıllarda bu alandaki çalışmalar hızlı bir ivme kazanmıştır. Bu dönemde BASF, Micronal markası altında mikroenkapsüle FDM'yi piyasaya sürerek, alçıpan ve sıva gibi malzemelere FDM entegrasyonunu sağlamıştır. Ardından, beton ve kil gibi diğer malzemelerle entegrasyon çalışmalarına başlanmıştır. Ticari olarak mevcut olan başlıca ürünler arasında Knauf'un Comfortboard alçıpanı ve Lehmorange'ın kil esaslı panoları yer almaktadır. Bu ürünler, 10 yılı aşkın süredir farklı bina uygulamalarında kullanılmaktadır (Harald ve diğ., 2022).

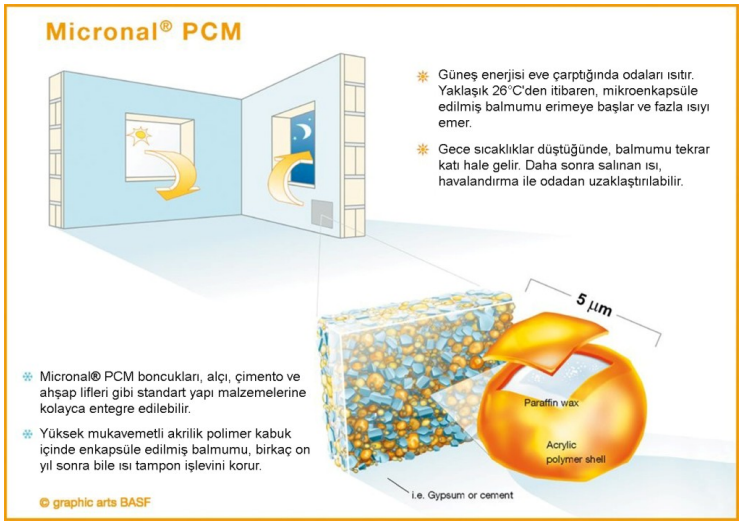
Nottingham Üniversitesi'nde gerçekleştirilen Mark Group Eco House projesi (Şekil 3.8.), BASF'nin mikroenkapsüle FDM içeren Comfortboard alçıpanının (Şekil 3.9.) enerji verimliliği üzerindeki etkilerini inceleyen önemli bir uygulama örneğidir. Bu projede, Micronal adı verilen mikroenkapsüle FDM, Knauf tarafından üretilen Comfortboard alçıpanında kullanılmış ve enerji verimli konut teknolojilerinin performansını değerlendirmeyi amaçlayan bir tasarımda yer almıştır. Projede, güneş ışığını doğrudan alan bir bölgede, standart alçıpan ve Micronal FDM içeren Comfortboard olmak üzere iki farklı alçıpan türü kullanılmıştır.



Şekil 3.8. Mark Group Eco House projesi (McLaren, 2015)

Bu projede FDM'ler, gizli ısı prensibiyle çalışarak ortam sıcaklıklarını dengeleme işlevi görmektedir. Sıcaklık arttığında, FDM ısıyı depolar; sıcaklık düştüğünde ise depoladığı ısıyı geri salarak ortamın sıcaklık dengesini sağlamaktadır. Bu özellik, Comfortboard'un iç mekânlardaki sıcaklık dalgalanmalarını azaltmasına katkı sağlar. Nottingham Üniversitesi, standart alçıpan ile Comfortboard arasındaki yüzey ısı akışını sürekli

izleyerek bir bilimsel karşılaştırma yapmaktadır (BASF, 2013). Bu proje, Micronal'in konut uygulamalarındaki performansını gerçek yaşam koşullarında değerlendirerek önemli bir analiz fırsatı sunmaktadır. Bu bağlamda, proje, FDM'lerin konut tasarımındaki potansiyel kullanımını teşvik eden hem teorik hem de pratik bilgiler sağlamaktadır (McLaren, 2015).



Şekil 3.9. BASF Micronal FDM (BASF, 2013)

2009 yılında, Charles Sturt Üniversitesi'nin Albury'deki Thurgoona Kampüsü (Şekil 3.10.), beton zeminlerde FDM'lerin kullanıldığı dünyadaki ilk proje olarak öne çıkmaktadır. Bu yenilikçi uygulama, FDM'lerin alçıpan tavanlara entegrasyonu ile de desteklenmiştir. Bu özellikler, kampüsün Avustralya Yeşil Bina Konseyi tarafından "altı yeşil yıldız derecesi" ve "dünya lideri" statüsüyle ödüllendirilmesine katkı sağlamıştır (McLaren, 2015).



Şekil 3.10. Charles Sturt Üniversitesi'nin Albury'deki Thurgoona Kampüsü (McLaren, 2015)

DuPont, Energain (Şekil 3.11.) adlı ürününü tanıtarak bu alandaki yerini almıştır. Energain, %60 parafin esaslı FDM ve %40 etilen kopolimer karışımından üretilen malzemeyi, 100 μm kalınlığındaki iki alüminyum levha arasında sıkıştırarak yaklaşık 5 mm kalınlığında bir panel haline getirmiştir. Bu paneller, alçıpanın arkasına yerleştirilen bölme duvarlarında ve tavanlarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır (URL-1). DuPont, binalarda Energain panellerinin maliyetleri ortalama %35 oranında azaltabileceğini ve kışın ısınma faturalarını %15 oranında düşürebileceğini iddia etmektedir. Ayrıca, yapılan malzeme analizleri, geleneksel betonun %17 enerji depolama kapasitesine sahip olduğu hacimle eşit hacimdeki FDM esaslı bu panellerin, çok daha yüksek ısı depolama kapasitesine sahip olduklarını göstermektedir (McLaren, 2015).



Şekil 3.11. DuPont, Energain ürünü uygulaması (McLaren, 2015)

Phase Change Energy Solutions firması, BASF Micronal ve DuPont Energain'den farklı olarak, parafin veya sert paneller kullanmadan BioPCM (Şekil 3.12.) üretmektedir.



Şekil 3.12. Phase Change Energy Solutions, BioPCM (McLaren, 2015)

Bu malzeme, soya, palmiye ve hindistan cevizi yağı üretiminden elde edilen atık maddelerle üretilir ve nano ölçekli silika parçacıkları içeren bir kalınlaştırıcı ile karıştırılır. Sonuçta, esnek plastik filmler içinde saklanan bir jel elde edilir. BioPCM, hem yeni hem de mevcut yapılarda yapı kabuğu bileşenlerine kolayca entegre edilebilir.

Victoria'da yer alan ve "9 Yıldızlı NatHERS Dereceli" olarak değerlendirilen bir konut projesinde (Şekil 3.13.), BioPCM kullanılarak enerji verimliliği sağlanmıştır. Bu projede, ısının ikinci kata yükselmesi nedeniyle sıcaklık kontrolü sağlanamayan alanlarda, BioPCM duvar bileşenlerine entegre edilerek yüksek termal kütle etkisi yaratacak şekilde kullanılmıştır. Mekândaki sıcaklık yükseldiğinde FDM eriyerek bu ısıyı depolamakta ve mekân sıcaklığının 24 ℃'nin üzerine çıkmasını engellemektedir (McLaren, 2015).



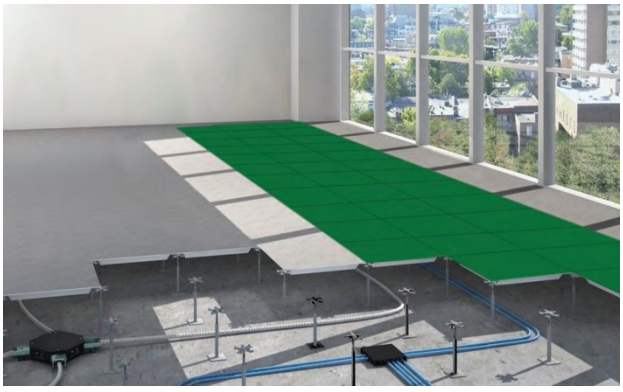
Şekil 3.13. Victoria'daki 9 Yıldızlı NatHERS dereceli konut projesi (McLaren, 2015)

İsviçreli GlassX firmasının Crystal ürünü (Şekil 3.14.), FDM'lerin ilginç bir kullanımını ortaya koymaktadır. Crystal, dört katmanlı bir cam pencere sistemidir ve bu sistemin iki cam paneli arasında saydam bir tuz-hidrat FDM bulunur. Bu cam panel, betonla karşılaştırılabilir düzeyde enerji depolama kapasitesine sahip olup, FDM'in katı fazında görünür ışığın %28'ini, sıvı fazında ise %45'ini geçirmektedir. Bu özellik, yüksek termal kütleye sahip bir yapı kabuğunun aynı zamanda güneş ışığını geçirebilmesine olanak tanımaktadır (URL-2). GlassX'in Crystal ürünü, FDM'lerin yenilikçi bir şekilde kullanımını sağlayarak, binalarda enerji verimliliğini artırmakla birlikte, doğal ışık geçişini optimize etmeyi mümkün kılmaktadır.



Şekil 3.14. GlassX, Crystal ürünü uygulaması (URL-2)

Tate Access Floors firması, zeminlerde FDM kullanımına yönelik farklı bir yaklaşım sergileyerek EcoCore panellerini (Şekil 3.15.) geliştirmiştir. Bu paneller, yükseltilmiş döşeme sistemlerinde kullanılarak ofislerin kablolama ve klima gibi altyapı sistemlerinin zemin altına gizlenmesini sağlar. Özellikle binanın bol güneş ışığına maruz kalan bölgelerinde döşeme kaplama malzemesi olarak kullanılan bu paneller, içerdiği FDM'ler sayesinde ısıyı emer ve ofise giren sıcaklığı kontrol altında tutar. Tate tarafından yapılan testler, bu sistemin, tipik beton zeminlere kıyasla klima ihtiyacını %17,7 oranında azalttığını ortaya koymaktadır (McLaren, 2015).



Şekil 3.15. EcoCore panelleri (McLaren, 2015)

Hamburg'daki Uluslararası Yapı Sergisi (IBA) kapsamında yer alan ve birincilik ödülü kazanan "Smart is Green" konut projesi (Şekil 3.16(a)), 1000 m²'yi geçmeyen alanda bağımsız bir konutun inşasını hedeflemiştir (URL-3). Projede, çevresel ve sosyal değişimlere uyum sağlamak amacıyla FDM perdeleri (Şekil 3.16(b)) kullanılmıştır. Bu perdeler, güneş ışığından elde edilen ısının depolanmasını sağlamakta ve gece saatlerinde bu ısıyı serbest bırakarak iç mekân sıcaklığını dengelemektedir. Yani FDM,

aşırı ısının merkezi bir enerji depolama sistemi olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.16. (a) Smart is Green konut projesi; (b) Uygulanan FDM perdeleri (URL-3)

Mimari tasarımda FDM uygulanan örnekler, FDM kullanımının, gerek enerji verimliliğini artıran gerekse yeşil bina sertifikasyon süreçlerinde avantaj sağlayan bir çözüm sunabileceğini açıkça göstermektedir. FDM teknolojisi, hafif yapıların termal kütle eksikliğini gidererek, enerji verimliliğini sağlayan önemli bir çözüm sunmaktadır.

3.3.6. Faz Değiştiren Malzemelerin Üretim ve Uygulanmasına Yönelik Standartlar

FDM'lerin en temel özelliklerinden biri olan ısı depolama kapasitesinin sıcaklıkla ilişkisi, kalorimetrik yöntemler aracılığıyla ölçülmektedir. Bu ölçüm süreçlerini standartlaştırmak amacıyla, farklı yöntemleri kapsayan bir dizi standart geliştirilmiştir. Diferansiyel taramalı kalorimetreler (DSC) için bir ölçüm standardı, IEA Güneş Isıtma ve Soğutma/Enerji Depolama Yoluyla Enerji Koruma Programı kapsamında, "Compact Thermal Energy Storage: Material Development for System Integration" başlıklı Görev 42/Ek 24 çalışmasında oluşturulmuştur (Gschwander ve diğ., 2015).

Isı akış ölçer cihazı (HFM) için ise, ASTM C1784-20 standardı oluşturulmuştur. Bu standart, "Standard Test Method for Using a Heat Flow Meter Apparatus for Measuring Thermal Storage Properties of Phase Change Materials and Products" (ASTM C1784-20, 2020) olarak FDM'lerin ısı depolama kapasitelerinin belirlenmesi amacıyla geliştirilmiştir.

RAL FDM Kalite ve Test Spesifikasyonları (RAL-GZ 896), FDM'ler ile ilgili kapsamlı bir çerçeve sunmaktadır. Bu standart, FDM'lerin sıcaklıkla değişen ısı depolama kapasitelerinin belirlenmesinin yanı sıra, çevrim stabilitesinin de değerlendirilmesini kapsamaktadır. RAL-GZ 896, kalite yönetimi süreçlerinde hem üretici öz denetimlerini

hem de bağımsız denetçiler tarafından gerçekleştirilen periyodik dış denetimleri içeren ayrıntılı bir izleme sistemi sunmaktadır. Bu süreçten başarıyla geçen ürünler, "RAL PCM Kalite İşareti" ile ödüllendirilmektedir. 2006 yılında ilk kez geliştirilen bu kalite spesifikasyonları, düzenli olarak güncellenmekte ve en son teknolojik gelişmeler doğrultusunda, güncel haliyle RAL PCM Kalite Derneği'nin web sitesinde yayımlanmaktadır (URL-4).

Soğuk zincir sektörünün ticari önemi, taşınan malzemelerin miktarı ve değerinin yüksekliği göz önünde bulundurulduğunda, bu sektörün kendine ait test standartlarına sahip olması beklenen bir durumdur. FDM uygulamalarıyla ilgili en eski standart, 1993 yılından itibaren yayımlanan ASHRAE Soğuk Termal Depolama Tasarım Kılavuzu olarak kabul edilmektedir (ASHRAE, 2019). Bu kılavuz, soğuk termal enerji depolama sistemlerinin tasarımı, modellemesi, maliyeti ve uygulama süreciyle ilgili kapsamlı bilgiler sunmaktadır.

Bu alandaki yaygın kullanılan standartlardan biri, Uluslararası Güvenli Taşıma Derneği (ISTA) (URL-5) tarafından geliştirilen STD-7E standardıdır. Bu standart, "Testing Standard for Thermal Transport Packaging Used in Parcel Delivery System Shipment" olarak bilinir ve soğuk zincir taşımacılığında kullanılan ambalajların performansını değerlendirmek amacıyla uygulanmaktadır (URL-6).

Daha güncel bir tasarım kılavuzu ise, 2016 yılında yayımlanan VDI 2164 "PCM energy storage systems in building services" kılavuzudur (VDI 2164, 2016). Bu kılavuz, FDM'nin bina teknik ekipmanlarında uygulanmasına yönelik temel ilkeleri belirlemektedir. Ayrıca, pasif yüzey ısıtma ve soğutma sistemleri (örneğin, bina malzemeleri ve bileşenleri), aktif yüzey ısıtma ve soğutma sistemleri (soğutma tavanları vb.), soğutma için dağıtılmış taze hava sistemleri ve ısıtma ve soğutma için merkezi taze hava sistemleri gibi çeşitli uygulama alanlarına da değinmektedir.

Hollanda'da ise benzer bir kılavuz bulunmaktadır. Bu kılavuz, Hollanda ISSO Yayını 111 "Phase Change Materials (PCM)" olarak bilinse de, şu anda yalnızca Flemenkçe olarak mevcut olduğundan, detaylı bilgi bulunmamaktadır.

3.4. Konu İle İlgili Yayınların Değerlendirilmesi

FDM'lerin bina bileşenlerinde uygulanmasına ilişkin incelenen çalışmalar FDM türü, duvar katmanındaki konumu, erime sıcaklığı ve iklim gibi faktörler göz önünde bulundurularak çeşitli parametreler üzerinden değerlendirilmiştir. Bu çalışmalar, FDM'lerin kullanımının iç mekân ısıl konforunu artırmada ve enerji tüketimini azaltmada etkili olduğunu göstermektedir.

- Yalnızca FDM içeren yapı kabuğunda, FDM konumu ve erime sıcaklığının enerji verimliliği üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmalar:

İngiltere'deki konut binalarında yaz aylarında yaşanan aşırı ısınma sorununu azaltmak için yapılan bir çalışmada FDM'lerin etkinliği simülasyon yöntemi ile değerlendirilmiştir. Tipik bir İngiltere orta sıralı konut modelinde yapılan analizlerde, bina konumu, iklim değişikliği ve yapısal faktörler (yalıtım, yapı tipi) dikkate alınmıştır. İngiltere konut stokunun %30'unu oluşturan bu konutlarda FDM'lerin aşırı ısınmayı azaltmada önemli bir etki yarattığı görülmüştür. İyi yalıtılmış binalar daha fazla FDM gereksinimi duyarken, hafif yapılar FDM'lerden daha fazla fayda sağlamıştır. Bu sonucun temel nedeni, hafif yapıların ısıl kütlesinin düşük olması nedeniyle iç ortam sıcaklık dalgalanmalarına daha duyarlı olmaları ve bu nedenle FDM'nin ısı depolama kapasitesinden daha etkin yararlanabilmeleridir. Çalışma, iklim değişikliği ile birlikte FDM'lerin İngiltere genelinde kullanışlı olacağını öngörmektedir (Auzeby ve diğ., 2016).

FDM'nin yapı kabuğunda en uygun konumunu belirlemeyi amaçlayan bir diğer çalışmada, Kansas'taki yaz koşullarını simüle eden bir dinamik duvar simüle edilmiştir. Simülatör, altı adet 1,19 m x 1,19 m duvar panelinden oluşan bir küpten ibarettir ve sıcaklığı 22-24 °C aralığında tutulan bir klima ile donatılmıştır. Çalışmada, FDM'nin optimum konumunun FDM'nin kalınlığı ve erime sıcaklığına bağlı olarak duvarın dış yüzeyine daha yakın olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, duvarın iç yüzey sıcaklığı arttıkça optimum konumun duvarın iç yüzeyine daha yakın olması gerektiği tespit edilmiştir (Jin ve diğ., 2016).

FDM'nin yapı kabuğundaki ideal konumunu ve erime sıcaklıklarının etkisi araştırılan

bir çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Yapılan analizler, yapı kabuğundaki FDM konumunun, dış ve iç çevre koşullarının performansı doğrudan etkilediğini ortaya koymuştur. Sıcaklık dağılımının olasılık-yoğunluk fonksiyonu kullanılarak yapılan incelemeler, iklimlendirilmemiş iç mekânlarda FDM katmanının duvarın iç yüzeyine yerleştirilmesi gerektiğini göstermiştir. Güney Avrupa için 16°C, Orta Avrupa için 11°C, Kuzey Avrupa için ise 20°C erime sıcaklığına sahip FDM'lerin uygulanması önerilmiştir (Lagou ve diğ., 2019).

İran'daki Tarbiat Modares Üniversitesi'nde gerçekleştirilen deneysel bir çalışmada, iç mekânlardaki ısıl konforu artırmak ve enerji verimliliğini sağlamak için FDM'lerin kullanımı incelenmiştir. FDM panelli bir deney odası ile FDM'siz bir oda karşılaştırılmıştır. Deneyler, laboratuvar ortamında harmonik ve doğrusal sıcaklık değişim süreçleri ile yapılmış, sonuçlar 5 seviyeli RSM CCD yöntemiyle analiz edilmiştir. Yaz mevsiminde FDM'li odada aşırı ısınma %13.83 azalırken, FDM verimliliği %56 olarak hesaplanmıştır. Kış mevsiminde ise FDM verimliliği %35.49 olarak tespit edilmiştir (Alizadeh ve Sadrameli, 2019).

- FDM-IY içeren yapı kabuğunun soğutma yükü üzerinde FDM ve IY konumunun, kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının etkilerinin araştırıldığı çalışmalar:

Tropikal iklimde soğutma yükünü azaltmak amacıyla yapılan bir çalışmada yapı kabuğuna entegre edilmiş FDM'lerin enerji performansı incelenmiştir. Singapur'da yapılan simülasyonlar, FDM'lerin soğutma yükünde ısı kazanımlarını %21-32 oranında etkili bir şekilde azaltabileceğini ortaya koymuştur. Özellikle, 28 °C erime sıcaklığına sahip 10 mm kalınlığında FDM'nin duvarların dış yüzeyine uygulanması en etkili sonuçları vermiştir (Tablo 3.2.). Bu bulgular, FDM'lerin yalnızca belirli mevsimlerde etkili olduğu diğer iklim bölgelerine nazaran tropik bölgelerde büyük bir avantaj sağladığını göstermektedir (Lei ve Yang, 2016).

Bir diğer çalışmada, Hindistan'da soğutma enerjisi talebinin önemli ölçüde artması öngörülen konut binalarında, FDM entegrasyonunun soğutma yükü yönetimine etkisi değerlendirilmiştir. FDM içeren bina duvarlarının enerji performansı, eşit termal direnç sağlayan ve yalnızca IY ile oluşturulan duvarlarla karşılaştırılmıştır. FDM'nin iç ortam sıcaklık kontrolünü iyileştirebilmesi için iç yüzeye yakın ve IY tarafından korunacak

şekilde konumlandırılmasının ideal olduğu belirlenmiştir. Bu bağlamda, en yüksek enerji performansı, 26 °C erime sıcaklığına sahip 10 mm kalınlığındaki FDM'nin içte ve 147,7 mm kalınlığındaki EPS'nin içte olduğu duvar kesitinde elde edilmiştir (Tablo 3.2.). Bu ideal duvar kesiti, soğutma yükünde %45,2 oranında enerji tasarrufu sağlamıştır (Rai, 2021).

Farklı iklim koşullarındaki ofis binalarının soğutma yükünü azaltmak amacıyla yapılan bir çalışmada FDM ve IY'nin enerji performansı incelenmiştir. Hindistan'daki beş farklı iklim tipi (Bangalore, Delhi, Jodhpur, Pune, Guwahati) için modeller DesignBuilder yazılımıyla geliştirilmiştir. FDM ve IY entegre edilen binalar, soğutma enerji taleplerini Bangalore'da %64, Delhi'de %61, Jodhpur'da %57, Pune'da %63 ve Guwahati'de %58-59 oranında azaltmıştır. 27 °C erime sıcaklığına sahip 20 mm kalınlığında FDM ve 50 mm kalınlığında XPS esaslı IY'nin duvarların dış yüzeyine uygulanması en etkili sonuçları vermiştir (Tablo 3.2.). Gece havalandırma stratejileri, doğal havalandırma durumunda soğutma yüklerini daha da azaltabilmiştir (Arumugam ve diğ., 2022).

Doğal havalandırma ile birlikte FDM ve IY kullanılarak ofis binalarında ısıl konforu artırmayı amaçlayan bir çalışmada DesignBuilder yazılımıyla Chennai iklim koşullarına göre dört farklı bina modeli analiz edilmiştir. Tuğla-FDM (içte) entegrasyonunun yeterli ısıl konfor sağlamadığı tespit edilmiştir. Ancak IY (dışta)-tuğla-FDM (içte) entegrasyonu, IY'nin varlığı sayesinde saatlik ortalama sıcaklığı sırasıyla 26,8 °C ve 26,6 °C'ye düşürerek tolere edilebilir sıcaklık aralığında kalmıştır. Duvar kesitinde, 27 °C erime sıcaklığına sahip 30 mm kalınlığında FDM ve 50 mm kalınlığında XPS yalıtım önerilmiştir (Tablo 3.2.). Bu ideal duvar kesiti, soğutma yükünde %61 enerji tasarrufu sağlamıştır ve iç ortam sıcaklığını 2,7 °C düşürmüştür (Arumugam ve diğ., 2024).

Tablo 3.2. FDM-IY içeren yapı kabuğunun soğutma yükü üzerinde FDM ve IY konumunun, kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının etkilerinin araştırılması

Referans	Konum	İdeal FDM-IY Türü	İdeal FDM-IY Konum ve Kalınlıkları (mm)	Soğutma En Yüksek Enerji Tasarruf Oranı (%)
Lei ve Yang, 2016	Singapur	FDM: 28 °C IY: -	FDM: Dışta, 10 mm IY: -	21-32

Tablo 3.2. (Devam) FDM-IY içeren yapı kabuğunun soğutma yükü üzerinde FDM ve IY konumunun, kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının etkilerinin araştırılması

Rai, 2021	Hindistan	FDM: 26 °C IY: EPS	FDM: İçte, 10 mm IY: İçte, 147,7 mm	45,2
Arumugam ve diğ., 2022	Bangalore, Delhi, Jodhpur, Pune, Guwahati	FDM: 27 °C IY: XPS	FDM: Dışta, 20 mm IY: Dışta, 50 mm	Bangalore: 64 Delhi: 61 Jodhpur: 57 Pune: 63 Guwahati: 58-59
Arumugam ve diğ., 2024	Chennai	FDM: 27 °C IY: XPS	FDM: İçte, 30 mm IY: Dışta, 50 mm	61

- FDM-IY içeren yapı kabuğunun ısıtma yükü üzerinde FDM ve IY konumunun, kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının etkilerinin araştırıldığı çalışmalar:

Yapı kabuğuna entegre edilen FDM'nin enerji performansını optimize etmek için sayısal simülasyonlar yapılan bir çalışmada Tunus'taki iki tipik konut binası analiz edilmiştir. FDM'nin erime sıcaklığı, FDM-IY kalınlıkları ve duvarda çift FDM katmanı gibi çeşitli parametrelerin enerji tasarrufu üzerindeki etkileri incelenmiştir. En yüksek enerji performansı, 25 °C erime sıcaklığına sahip 10 mm kalınlığında FDM'nin dışta (IY'na göre iç bölgede) ve 50 mm kalınlığında EPS'nin ise en dışta olduğu duvar kesitinde sağlanmıştır (Tablo 3.3.). Isıtma yükünde bu ideal kesit ile en yüksek enerji tasarruf oranı %15,53 olarak hesaplanmıştır (Dardouri ve diğ., 2023).

İran'daki dört farklı iklim koşuluna sahip şehirlerde (Tahran, Bender Abbas, Tebriz, Reşt) enerji ve ısıl konfor optimizasyonu yapılmıştır. PU esaslı ısı yalıtımı ve 21 °C erime sıcaklığına sahip FDM'nin iç bölgede yer aldığı kesit en ideal olarak belirlenmiştir. IY kalınlığı 69 mm ile 98 mm arasında, FDM kalınlığı ise (Tahran hariç) yaklaşık 50 mm olarak optimize edilmiştir (Tablo 3.3.). Isıl konfor %25-60 oranında artırılırken, ısıtma yükü %43-99 arasında iyileştirilmiştir (Hamooleh ve diğ., 2024).

Üç farklı strateji kullanılarak simülasyonlar yapılan bir çalışmada ilk strateji malzemelerin ve yalıtım katmanlarının düzenine odaklanırken, ikinci strateji farklı malzemelerin ve FDM'nin konumlandırılmasını incelemiştir. Üçüncü strateji, NIST Teknik Notu 1765'e dayalı olarak FDM ve IY katmanlarının entegre edilmesinin sinerjik etkilerini araştırmıştır. Kansas City'deki bir bina modelinde yapılan simülasyon

sonuçlarına göre, üç stratejiyle elde edilen maksimum enerji tasarrufları sırasıyla %16,4, %33,02 ve %37,88'dir. En yüksek enerji performansı, 25 °C erime sıcaklığına sahip 100 mm kalınlığında FDM'nin iç bölgede, 38 mm kalınlığında PU'nın dışta olduğu duvar kesitinde sağlanmıştır (Tablo 3.3.). Isıtma yükü için en yüksek tasarruf oranı %38 olarak hesaplanmıştır (Asghari ve diğ., 2024).

Tablo 3.3. FDM-IY içeren yapı kabuğunun ısıtma yükü üzerinde FDM ve IY konumunun, kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının etkilerinin araştırılması

Referans	Konum	İdeal FDM-IY Türü	İdeal FDM-IY Konum ve Kalınlıkları (mm)	Isıtma En Yüksek Enerji Tasarruf Oranı (%)
Dardouri ve diğ., 2023	Tunus	FDM: 25 °C IY: EPS	FDM: Dışta, 10 mm IY: Dışta, 50 mm	15,53
Hamooleh ve diğ., 2024	Tahran, Bender Abbas, Tebriz, Reşt	FDM: 21 °C IY: PU	FDM: İçte, 50 mm IY: Dışta, 69-98 mm	43-99
Asghari ve diğ., 2024	Kansas City	FDM: 25 °C IY: PU	FDM: İçte, 100 mm IY: Dışta, 38 mm	38

- FDM-IY içeren yapı kabuğunun soğutma ve ısıtma yükü üzerinde FDM ve IY konumunun, kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının etkilerinin araştırıldığı çalışmalar:

Yapı kabuğunda kullanılan FDM'lerin, bina enerji verimliliği üzerindeki etkileri incelenen bir çalışmada analizler, sıcak-kuru iklimi temsilen Diyarbakır ve soğuk iklimi temsilen Erzurum şehirleri için gerçekleştirilmiştir. Farklı dış duvar alternatiflerinin ısıtma, soğutma ve toplam enerji tüketimine etkileri simülasyon yöntemi ile değerlendirilmiştir. FDM-IY kombinasyonunun kullanımı enerji performansını önemli ölçüde artırmıştır. En yüksek enerji performansı, 21 °C erime sıcaklığına sahip 60 mm kalınlığında FDM'nin içte ve 60 mm kalınlığında IY'nin dışta olduğu duvar kesitinde elde edilmiştir (Tablo 3.4.). Bu ideal kesit ile soğutma yükünde en yüksek tasarruf oranı %27,55, ısıtma yükünde ise %11,47 olarak hesaplanmıştır (Depe, 2017).

Yapı kabuğunda (dış duvar ve çatı elemanlarında) FDM içeren farklı alternatiflerin enerji verimliliği incelenen bir diğer çalışmada, analizler simülasyon yöntemi ile yapılmıştır. Sıcak-kuru ve soğuk iklim bölgelerini temsilen Diyarbakır ve Erzurum

şehirleri analiz kapsamına alınmıştır. Yapılan analizler sonucunda, Diyarbakır'da kış döneminde 23 °C, yaz döneminde ise 25 °C erime sıcaklığına sahip FDM'nin en iyi performansı gösterdiği tespit edilmiştir. Erzurum'da ise her iki dönem için de 25 °C erime sıcaklığına sahip FDM ideal olarak belirlenmiştir. En yüksek enerji verimliliği, 10 mm kalınlığında FDM'nin içte ve 125 mm kalınlığında IY'nin dışta olduğu duvar kesitinde elde edilmiştir. Bu ideal kesit ile soğutma yükünde, Diyarbakır'da %11,31, Erzurum'da %12,27; ısıtma yükünde ise sırasıyla %34,38 ve %31,07 oranında enerji tasarrufu sağlanmıştır (Coşkuner, 2018) (Tablo 3.4.).

Konutların tasarım aşamasında alınacak tasarım önlemleri ile yıllık ısıtma, soğutma ve toplam enerji harcamalarının azaltılmasının amaçlandığı bir çalışmada, yapı kabuğunda FDM kullanımı ile toplam enerji tüketiminin düşürülmesi hedeflenmiştir. İstanbul ve Diyarbakır illerinde belirlenen bir konut üzerinde simülasyon yapılmıştır. Sonuçlara göre, en yüksek enerji performansı, İstanbul için 23 °C, Erzurum için 26 °C erime sıcaklığına sahip 50 mm kalınlığında FDM'nin dışta (IY'nin iç yüzeyinde) ve 45 mm kalınlığında IY'nin dışta olduğu duvar kesitinde elde edilmiştir (Tablo 3.4.). Soğutma yükünde en yüksek tasarruf oranı %39,41, ısıtma yükünde ise %13,65 olarak hesaplanmıştır (Köse, 2019).

Bir diğer çalışmada, farklı yönlere bakan bina dış duvarlarında IY (cam yünü) yerine FDM kullanılmasıyla ısıtma ve soğutma yükleri sayısal olarak analiz edilmiştir. Analizler, Elazığ'ın iklim koşulları göz önünde bulundurularak yürütülmüştür. Sonuçlara göre, en yüksek enerji performansı, yaz koşulları için 29 °C, kış koşulları için 17 °C erime sıcaklığına sahip 20 mm kalınlığında FDM'nin dış bölgede yer aldığı duvar kesitinde elde edilmiştir (Tablo 3.4.). Yalıtımsız duvara nazaran bu ideal kesit ile soğutma yükünde en yüksek tasarruf oranı %7,21, ısıtma yükünde ise %13,13 olarak hesaplanmıştır (Çakmak, 2019).

Gizli ısı depolama kapasitesinin en verimli şekilde kullanılması amaçlanan bir çalışmada enerji tasarrufu ile ısıl konfor üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Analizler, Marmara Bölgesi'nin sıcak ve ılıman iklim koşullarında bulunan, aralıklı olarak soğutulan bir ofis odasında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre, FDM'nin gizli ısı depolama kapasitesinden maksimum fayda sağlamak için katmanın iç kısma yakın yerleştirilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Dış kısma yerleştirilmesi ise enerji tasarrufu

sağlamamış, hatta enerji talebini artırmıştır. En yüksek enerji tasarrufu, 25 °C erime sıcaklığına sahip 23 mm FDM'nin içte ve 60 mm IY'nin dışta olduğu duvar kesiti ile sağlanmış olup, bu kombinasyon %12.8 oranında enerji tasarrufu sağlamıştır (Tunçbilek ve diğ., 2020) (Tablo 3.4.).

Duvar ve çatı katmanlaşmalarında FDM ve IY'nin birlikte kullanıldığı bir çalışmada farklı derece-gün bölgelerine, erime sıcaklıklarına, kalınlıklarına ve katmanlaşmadaki konumlarına bağlı olarak yıllık ısıtma, soğutma ve toplam enerji yüklerine etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında İzmir, İstanbul, Ankara, Van ve Erzurum şehirleri değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre; (i) İstanbul ve Van'daki soğutma yükü için 29 °C erime sıcaklığına sahip FDM, diğer bölgelerdeki yükler için 21 °C erime sıcaklığına sahip FDM ideal olarak belirlenmiştir; (ii) tüm bölgeler için ideal FDM kalınlığı 70 mm ve IY kalınlığı 40 mm'dir; (iii) sadece Erzurum için FDM'nin içte olduğu durum toplam yükün en az olduğu kesit olmasına rağmen diğer tüm bölgelerde ideal konum dış bölgede yer almasıdır. İdeal kesit ile soğutma yükünde, %0,29-2,87 ve ısıtma yükünde %3,84-18 oranında enerji tasarrufu sağlanmıştır (Anayurt, 2021) (Tablo 3.4.).

Binalardaki ısıtma ve soğutma yüklerini azaltmak için FDM-IY kullanım olanaklarını optimize etmeyi amaçlayan bir çalışmada Türkiye'nin Kocaeli ilindeki iklim koşullarına dayalı matematiksel hesaplama yöntemleri ile analizler yapılmıştır. En yüksek enerji performansı, 25 °C erime sıcaklığına sahip 15 mm kalınlığında iki katmanlı FDM'nin iç ve dış bölgede ve 20 mm kalınlığında dış bölgedeki IY ile kombine edildiği duvar kesitinde elde edilmiştir (Tablo 3.4.). Bu kombinasyon ile soğutma yükünde %17,7, ısıtma yükünde %16,3 enerji tasarrufu sağlanmıştır (Arıcı ve diğ., 2022).

FDM ve IY eklenmesi ile binalardaki yüksek enerji talebini yönetmek için etkili bir teknik sunmayı amaçlayan bir çalışmada Orta Doğu'da analizler yapılmıştır. Sonuçlara göre, yaz aylarında FDM içeren duvarların performansı daha yüksek bulunmuş, kış aylarında ise IY'nin FDM'den üstün olduğu görülmüştür. Ancak, FDM-IY kombinasyonunun kullanılması, toplam enerji talebini tek başına FDM veya IY içeren duvar kesitlerine nazaran daha düşük seviyelere çekmiştir. En yüksek enerji performansı, 24 °C erime sıcaklığına sahip 10 mm kalınlığında FDM'nin iç bölgede ve 80 mm kalınlığında IY'nin dış bölgede olduğu duvar kesitinde sağlanmıştır (Tablo 3.4.). Bu ideal kesit ile soğutma yükünde en yüksek tasarruf oranı %87, ısıtma yükünde ise

%24,1 olarak hesaplanmıştır (Kalbasi ve Afrand, 2022).

Müstakil bir konuta FDM entegre edilen bir çalışmada enerji kullanımının azaltılması amaçlanmıştır. Akdeniz iklim koşullarında, ideal konfigürasyonu belirlemek amacıyla farklı faz geçiş sıcaklıkları, cam tipleri, FDM konumları (içte, ortada, dışta) ve aktif gölgelendirme senaryoları enerji tasarrufu açısından değerlendirilmiştir. Analizler sonucunda, FDM'nin ideal erime sıcaklığının mevsime bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Soğutma mevsimi için 27 °C, ısıtma mevsimi için ise 21 °C ideal erime sıcaklığı olarak belirlenmiştir. En yüksek enerji tasarrufu, 30 mm kalınlığında FDM'nin içte olduğu duvar kesiti ile elde edilmiş olup, bu kesit soğutma yükünde %21,7, ısıtma yükünde ise %19,4 enerji tasarrufu sağlamıştır (Uludaş ve diğ., 2022) (Tablo 3.4.).

Türkiye'nin farklı iklim koşullarına sahip bölgelerinde bir ofis binasına çift cidarlı cephe sistemi eklenen bir çalışmada bu sisteme FDM entegrasyonunun enerji tüketimi üzerindeki etkileri simülasyon yöntemi ile incelenmiştir. Analizler, İstanbul, Ankara, Erzurum, Antalya ve Diyarbakır illerindeki iklim verileri dikkate alınarak yapılmıştır. Çalışmada, FDM türü, konumu ve FDM-IY'nin birlikte veya ayrı ayrı kullanımı gibi değişkenler altında farklı enerji tüketimi alternatifleri değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre; (i) düşük ortalama sıcaklıklara sahip illerde düşük erime noktasına sahip FDM türleri faz değişimini tamamlayabilmiş ve enerji tüketimini azaltmıştır; (ii) İstanbul, Ankara ve Erzurum illerinde 21 °C, Antalya ve Diyarbakır illerinde ise 25 °C erime sıcaklığına sahip FDM daha iyi performans sergilemiştir; (iii) Antalya'da 20 mm, İstanbul ve Diyarbakır'da 30 mm, Ankara'da 40 mm ve Erzurum'da 50 mm kalınlıklarında XPS ve 74,2 mm kalınlığında FDM ideal performans sağlamıştır; (iv) yalıtımsız duvara nazaran ideal kesit ile soğutma yükünde %17,04-20,84, ısıtma yükünde ise %9,90-17,69 enerji tasarruf oranı sağlanmıştır (Kılınç, 2023) (Tablo 3.4.).

FDM'nin enerji verimliliğine etkisi, Elazığ iklim bölgesi için incelenen bir çalışmada, tasarlanan yapı için tuğla, beton blok ve gazbeton olmak üzere üç farklı duvar çekirdeği seçilmiştir. Binanın ısıtma ve soğutma yükleri hesaplanarak, yalıtımsız duvar, FDM'li duvar ve yalıtım malzemelerinin (XPS, EPS, Taş Yünü) kullanıldığı farklı kombinasyonlar ile toplamda 39 senaryo oluşturulmuştur. Sonuçlar, gazbeton çekirdeğe sahip duvar kesitinde en yüksek enerji performansının, 21 °C erime sıcaklığına sahip 50 mm kalınlığında FDM'nin dış bölgede ve 50 mm kalınlığında XPS'nin dış bölgede

(FDM'nin dış yüzeyinde) olduğu duvar kesitinde elde edildiğini göstermiştir (Tablo 3.4.). Böylece, yalıtımsız duvara nazaran soğutma yükünde %2,5, ısıtma yükünde ise %28,65 oranında enerji tasarrufu sağlanmıştır (Özdemir, 2023).

Dış duvara entegre FDM ve IY'nin etkileri değerlendirilen bir çalışmada, her iki malzemenin de temel parametreleri optimize edilmiştir. İlk olarak, FDM'nin yüksek termal iletkenliğine rağmen IY'ye nazaran daha iyi performans gösterip göstermediği analiz edilmiştir. Daha sonra, toplam duvar kalınlığı sabit tutularak, enerji tasarrufu açısından FDM ve IY'nin birlikte kullanımının etkili olup olmadığı araştırılmıştır. Sonuçlar, FDM-IY kombinasyonunun yalnızca IY kullanımına göre daha yüksek enerji tasarrufu sağladığını ortaya koymuştur. En yüksek performans, 15-30 °C erime sıcaklığına sahip 2 mm kalınlığındaki FDM'nin içte ve 38 mm kalınlığındaki yalıtımın içte (FDM'nin önünde) olduğu durumda elde edilmiştir. Bu kombinasyon, yalnızca IY kullanımına nazaran %7,3 oranında daha fazla enerji tasarrufu sağlamıştır (Tunçbilek ve diğ., 2023).

Xi'an'daki binalarda FDM entegrasyonunun enerji, ekonomik ve çevresel etkilerinin analiz edildiği bir diğer çalışmada, duvarların ısıtma ve soğutma yükleri hesaplanmıştır. Yaz döneminde iç ortam sıcaklığına yakın bir erime sıcaklığına sahip FDM ideal sonuçları vermiştir. Dıştan içe EPS-tuğla-FDM duvar katmanının en ideal olduğu tespit edilmiştir. En yüksek enerji performansı, 27 °C erime sıcaklığına sahip 40 mm kalınlığında FDM'nin iç bölgede ve 40 mm kalınlığında EPS'nin dış bölgede iken sağlanmış; bu durumda soğutma yükünde %40,16, ısıtma yükünde ise %29,39 enerji tasarrufu elde edilmiştir (Zhang ve diğ., 2024) (Tablo 3.4.).

Tablo 3.4. FDM-IY içeren yapı kabuğunun soğutma ve ısıtma yükü üzerinde FDM ve IY konumunun, kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının etkilerinin araştırılması

Referans	Konum	İdeal FDM-IY Türü	İdeal FDM-IY Konum ve Kalınlıkları (mm)	Isıtma En Yüksek Enerji Tasarruf Oranı (%)	Soğutma En Yüksek Enerji Tasarruf Oranı (%)
Depe, 2017	Diyarbakır, Erzurum	FDM: 21 °C IY: XPS	FDM: İçte, 60 mm IY: Dışta, 60 mm	Diyarbakır: 3,65 Erzurum: 11,47	Diyarbakır: 5,75 Erzurum: 27,55
Coşkuner, 2018	Diyarbakır, Erzurum	FDM: 23-25 °C IY: XPS	FDM: İçte, 10 mm IY: Dışta, 125 mm	Diyarbakır: 34,38 Erzurum: 31,07	Diyarbakır: 11,31 Erzurum: 12,27

Tablo 3.4. (Devam) FDM-IY içeren yapı kabuğunun soğutma ve ısıtma yükü üzerinde FDM ve IY konumunun, kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının etkilerinin araştırılması

Köse, 2019	İstanbul, Diyarbakır	FDM: 23-26 °C IY: XPS	FDM: Dışta, 50 mm IY: Dışta, 45 mm	İstanbul: 13,65 Diyarbakır: 6,05	İstanbul: 39,41 Diyarbakır: 15,78
Çakmak, 2019	Elazığ	FDM: 17-29 °C IY: -	FDM: Dışta, 20 mm IY: -	13,13	7,21
Tunçbilek ve diğ., 2020	Marmara Bölgesi	FDM: 25 °C IY: Cam yünü	FDM: İçte, 23 mm IY: Dışta, 60 mm	Toplam Enerji Tasarruf Oranı: 12,8	
Anayurt, 2021	İzmir, İstanbul, Ankara, Van, Erzurum	FDM: 21-29 °C IY: XPS	FDM: Dışta, 70 mm IY: Dışta, 40 mm	İzmir: 18 İstanbul: 17 Ankara: 5,46 Van: 5,03 Erzurum: 3,84	İzmir: 0,5 İstanbul: - Ankara: 0,29 Van: 0,86 Erzurum: 2,87
Arıcı ve diğ., 2022	Kocaeli	FDM: 25 °C IY: -	FDM: İçte ve dışta 15 mm IY: Dışta, 20 mm	16,3	17,7
Kalbasi ve Afrand, 2022	Orta Doğu	FDM: 24 °C IY: -	FDM: İçte, 10 mm IY: Dışta, 80 mm	24,1	87
Uludaş ve diğ., 2022	Akdeniz Bölgesi	FDM: 21-27 °C IY: -	FDM: İçte, 30 mm IY: -	19,4	21,7
Kılınç, 2023	Antalya, İstanbul, Diyarbakır, Ankara, Erzurum	FDM: 21-25 °C IY: XPS	FDM: İçte, 74.2 mm IY: Dışta, 30-40-50-65 mm	Antalya: 17,69 İstanbul: 17,12 Diyarbakır: 9,57 Ankara: 11,83 Erzurum: 9,90	Antalya: 17,04 İstanbul: 18,42 Diyarbakır: 16,91 Ankara: 20,84 Erzurum: 18,14
Özdemir, 2023	Elazığ	FDM: 21 °C IY: XPS	FDM: Dışta, 50 mm IY: Dışta, 50 mm	28,65	2,5
Tunçbilek ve diğ., 2023	-	FDM: 15-30 °C IY: Cam yünü	FDM: İçte, 2 mm IY: İçte, 38 mm	Toplam Enerji Tasarruf Oranı: 7,3	
Zhang ve diğ., 2024	Xi'an	FDM: 27 °C IY: EPS	FDM: İçte, 40 mm IY: Dışta, 40 mm	29,39	40,16

Yapılan literatür araştırmasına istinaden, FDM-IY katmanlarının ısıl performansı üzerinde FDM'nin erime sıcaklığının, kalınlığının, konumunun, IY malzemesi ile kombinasyonunun ve yapı kabuğundaki FDM-IY oranının önemli etkileri olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, farklı iklim bölgelerinde gerçekleştirilen simülasyonlarda, bu parametrelere ek olarak bina yönelimi, havalandırma stratejileri ve bina kullanım senaryolarının da önemli olduğu anlaşılmaktadır. Bu doğrultuda, literatürde önemi vurgulanan parametrelerin özellikle ülkemizin farklı iklim koşullarındaki etkinliğini gerek ısıl performans ve enerji tasarrufu gerekse ekonomik yönden detaylı bir şekilde irdeleme konusunda tespit edilen açığı gidermek hedeflenmektedir.

4. MALZEME VE YÖNTEM

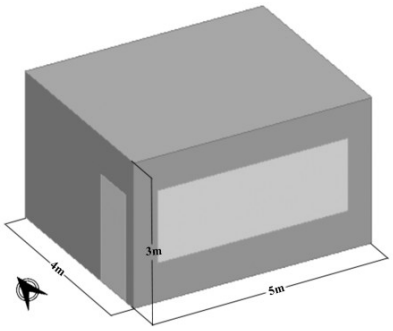
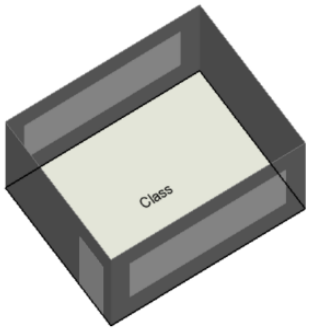
Çalışmanın bu aşamasında yukarıda bahsedilen amaçlar doğrultusunda, Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde yer alan eğitim binalarında, FDM-IY katmanlarının ideal konumu ve kalınlığını ve FDM erime sıcaklığını belirlemek üzere simülasyon tabanlı analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular ışığında, söz konusu değişkenlerin etkisi tek tek incelenerek en uygun duvar katmanlaşması ve malzeme konfigürasyonu belirlenmeye çalışılmaktadır.

4.1. Simüle Edilen Bina Özellikleri

- 500 x 400 x 300 (cm) ölçülerinde eğitim binası olarak işlevlendirilen tek katlı ve tek hacimden oluşan bir bina simüle edilmiştir (Tablo 4.1.).
- Batı duvarı, 90 cm genişliğinde ve 220 cm yüksekliğinde bir ahşap kapı ile donatılmıştır. Güney duvarı ise uzunluğu 400 cm ve yüksekliği 150 cm olan bir pencere ile donatılmıştır.
- Pencerenin alt kısmı ile zemin arasındaki mesafe 80 cm'dir. Pencere, toplam ısı iletim katsayısı (U) 2,8 W/m^2K, güneş ısı kazanç katsayısı 0,7 ve görünür ışık geçirgenliği 0,8 olan hareketsiz hava tabakası dolu çift cama sahiptir.
- Binanın konumu dış çevre faktörlerinden (gölgeleme, eğim vs.) etkilenmeyecek şekilde belirlenmiştir. Bulunduğu arazinin tüm cepheleri gölge almamaktadır ve arazide eğim bulunmamaktadır.
- Binanın her iki bölge için de teras çatılı ve zemine oturan döşemesinin olduğu kabul edilmiştir.
- Eğitim binasının sürekli aktif olduğu varsayılmıştır. İç hava sıcaklığının hesaplandığı durumda FDM'nin etkisini daha iyi gözlemlemek amacıyla mekanik sistemler devre dışı bırakılmıştır. Enerji tüketimi hesaplandığı durumda ise yüklerin hesaplanması için mekanik sistemler, 07.00 – 24.00 arası aktif ve 00.00 – 07.00 arası pasif durumdadır.

Binaya ilişkin veriler Tablo 4.1.'de sunulmuştur.

Tablo 4.1. Binanın geometrik modeli ve binaya ilişkin veriler

Bina Modeli	Binaya İlişkin Veriler	
	Bina İşlevi	Eğitim Binası
	Bina Ölçüleri (m)	5 x 4
	Kat Sayısı	1
	Kat Yüksekliği (m)	3
	Güney Yöndeki Pencerenin Saydamlık Oranı (%)	40
	Kullanım Saatleri	09.00-16.00
	Isıtma Sıcaklığı (°C)	19-21
	Soğutma Sıcaklığı (°C)	26-28

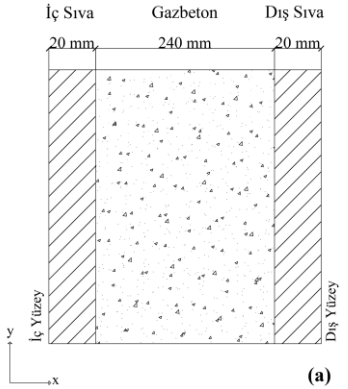
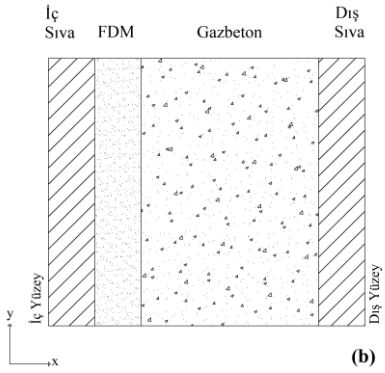
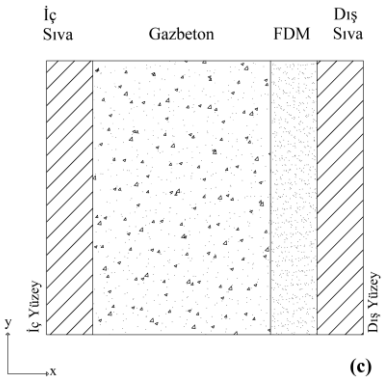
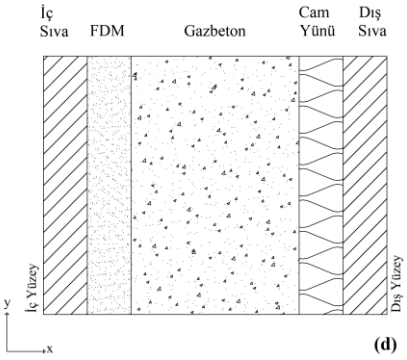
4.2. Etkinliği Araştırılan Duvar Kesitleri

Bu çalışmada, seçilen malzemelerin katmanlaşmasına yönelik dört farklı kombinasyon oluşturulmuştur. Herhangi bir FDM veya IY katmanı içermeyen duvar, referans duvar (Tablo 4.2.(a)) olarak tanımlanmış olup, detayları Tablo 4.3.'te yer almaktadır. FDM ve IY kombinasyonunun yapı kabuğundaki en uygun konumu ve kalınlığı ve FDM'nin ideal erime sıcaklığını belirlemek amacıyla:

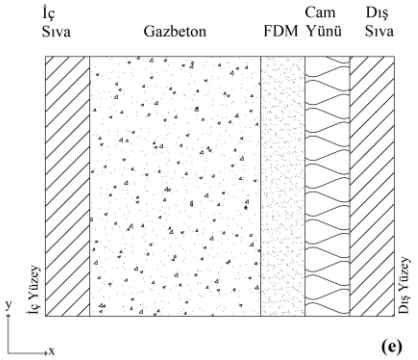
- Yalnızca FDM yapı kabuğunun iç katmanına (Tablo 4.2.(b)),
- Yalnızca FDM, yapı kabuğunun dış katmanına (Tablo 4.2.(c)),
- FDM iç katmana ve IY dış katmana (Tablo 4.2.(d)),
- FDM ve IY dış katmanlara ve IY FDM'nin önüne (Tablo 4.2.(e))

yerleştirilerek analizler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.2. Çalışmada simüle edilen yapı kabuğu katmanlarına ait kombinasyonlar

Duvar Kesit Kodu	Duvar Kesiti Türü	FDM-IY Konumu	Duvar kesiti
Ref	IY'siz ve FDM'siz (referans duvar kesiti)	-	
FDM(i)-(a)	Yalnızca FDM'li	İç yüzeyde	
FDM(d)-(a)	Yalnızca FDM'li	Dış yüzeyde	
FDM(i)-(a)/IY-(b)	IY ve FDM'li	FDM iç, IY dış yüzeyde	

Tablo 4.2. (Devam) Çalışmada simüle edilen yapı kabuğu katmanlarına ait kombinasyonlar

FDM(d)-(a)/IY-(b)	IY ve FDM'li	FDM IY'nin iç yüzeyinde	

Duvar kesitleri [FDM(d)-a/IY-b] veya [FDM(i)-a/IY-b] formatında kodlanmıştır. FDM ve IY sırasıyla faz değiştiren malzemeyi ve ısı yalıtımını temsil etmektedir. (d) ve (i) FDM'nin duvar kesitindeki konumunu belirtmektedir (d = dış, i = iç). "a" ve "b" ise sırasıyla FDM ve IY'nın kalınlıklarını sembolize etmektedir.

IY'nın yapı kabuğu içindeki konumu, yapı kabuğunun ısıl performansını etkilemektedir. En dış katmana yerleştirilen IY, duvar malzemelerinin yüzeyini iç mekân sıcaklığına yakın bir değerde tutarak sıcaklık dalgalanmalarını ve dolayısıyla malzemeler üzerinde ısıl gerilmelerin oluşumunu en aza indirmekte, yapı kabuğunun toplam ısı kaybını ve böylece yapının toplam ısıtma/soğutma enerji tüketimini azaltmaktadır. IY en iç katmana yerleştirildiğinde ise duvarın çekirdek malzemesi (örn. pişmiş toprak tuğla ya da gazbeton) yaz döneminde sıcak, kış döneminde soğuk bir yüzeye sahip olmakta ve dış ortamdaki gece gündüz sıcaklık farkından etkilenerek ısıl gerilmelere maruz kalmaktadır. Özellikle kış döneminde iç mekândaki sıcak havanın yapı kabuğundan dışarıya kaçması durumunda, bu hava sıcaklığının çiğleşme noktasının altına düşmesiyle duvar kesitinin herhangi bir bölgesinde yüzey ya da arayer yoğuşması gerçekleşmektedir. Özellikle arayer yoğuşması duvar kesiti içerisinde yer aldığından problemli bölgenin tespit edilebilmesi zordur. Yoğuşma sonucunda ısı yalıtım malzemelerinin boşlukları su ile dolarak ısı iletkenlik katsayısı artmakta ve malzeme ısı yalıtımı özelliğini kaybetmektedir. Ayrıca, yoğuşma sonucunda duvar kesitinde kullanıcı sağlığını riske atan küf ve mantar oluşumu gerçekleşmektedir (Toydemir ve diğ., 2019). Bu çalışmada yoğuşmayı ve sözü edilen dezavantajlarını önlemek amacıyla, IY her zaman duvar kesitinin dış katmanına yerleştirilmiştir.

4.3. Kullanılan Malzemeler

Yapı kabuğunda yer alan malzemelerin türü ve kalınlıkları TS 825'te (TS 825, 2024) belirtilen ısı iletkenlik katsayısına uygun olacak şekilde tasarlanmıştır. Yapı kabuğuna ait detaylar Tablo 4.3. ve kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri Tablo 4.4.'de verilmiştir.

Tablo 4.3. Yapı kabuğu katmanlarının tasarımı

Yapı Kabuğu Bileşeni	Katmanlar (İçeriden Dışarıya)
Çatı	20 mm çimento esaslı sıva, 120 mm betonarme döşeme, 30 mm çimento esaslı şap, 50 mm IY, su yalıtımı ve çakıl çatı kaplaması
Referans dış duvar (FDM'siz)	20 mm iç sıva, 240 mm gazbeton ve 20 mm dış sıva
Isı yalıtımı entegre edilmiş dış duvar	20 mm iç sıva, 240 mm gazbeton, 10/20/30 mm IY (cam yünü) ve 20 mm dış sıva

Tablo 4.4. Kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri

Malzeme Türü	Yoğunluk (kg/m³)	Isı iletkenlik katsayısı (W/mK)	Su buharı difüzyon direnç faktörü (μ)
Çimento esaslı sıva	2000	1,6	15/35
Gazbeton	500	0,15	5/10
IY (cam yünü)	32	0,04	1

Bu çalışmada kullanılan FDM, doğrudan DesignBuilder Programına ait veri tabanından seçilmiştir (BioPCM® M27/Q21). FDM'nin termofiziksel özellikleri Tablo 4.5'te özetlenmiştir. FDM kalınlığının ve erime sıcaklığının iç mekândaki ısıl konfor ve yapının toplam enerji tasarrufu oranı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için, farklı kalınlıklara (10-30 mm) ve erime sıcaklıklarına (21 ve 27 ºC) sahip FDM kullanılmıştır.

Tablo 4.5. FDM'nin termofiziksel özellikleri

Termofiziksel özellik		Değer
Yoğunluk (kg/m³)	Katı hal	880
	Sıvı hal	760
Isı iletkenlik katsayısı (W/mK)	Katı hal	0,2
	Sıvı hal	0,15
Özgül ısı (J/kgK)		2000
Max erime sıcaklığı (ºC)		21 ve 27

4.4. İklim Verileri

Binaların dış iklim koşullarına maruz kalan dış duvarları için bir yapı malzemesinin üretimi ve yaygın kullanımı sağlanırken, malzemenin birden fazla iklim özelliğine karşı iyi bir performans sergilemesi gerekmektedir. Söz konusu malzemenin, ortam sıcaklığı, nem, rüzgâr hızı, yağış türü ve miktarı gibi farklı iklim koşulları altında uzun hizmet ömrü boyunca beklenen performans kriterlerini koruyabilmesi gerekir. Bu nedenle, tasarlanan duvar kesitlerinin farklı iklim koşulları altında etkinliği değerlendirilmelidir. Ayrıca, dört mevsim özelliğinin aynı anda farklı bölgelerde görülebildiği ülkemizde, tüm iklim bölgelerinde aynı katmanlaşma, malzeme türleri ve kalınlıklara sahip aynı duvar kesitinin kullanılması, hem yapı kabuğunun özellikleri hem de kullanıcı sağlığı açısından olumsuz etkilere neden olabilir. Bu doğrultuda, yapı kabuğunun iklimsel uyumluluğunu artırmaya yönelik duvar kesiti tasarımlarında, bölgesel iklim verilerine dayalı analizlerin kullanılması, tasarım kararlarının bilimsel bir temele oturtulması açısından önemlidir. Türkiye'de, TS 825 Standardına göre belirlenmiş beş iklim bölgesi bulunmaktadır (Şekil 3.1.) (TS 825, 2024). İklim bölgelerine ait verilerin kabulünde, derece gün bölgelerine ait temsili iller:

- Birinci derece gün bölgesi için Antalya,
- İkinci derece gün bölgesi için İstanbul,
- Üçüncü derece gün bölgesi için Ankara,
- Dördüncü derece gün bölgesi için Van,
- Beşinci derece gün bölgesi için Erzurum

olarak seçilmiştir. Bu sınıflandırma, Köppen-Geiger iklim sınıflandırmasına dayanmaktadır (Kottek ve diğ., 2006).

Saatlik çevresel koşullar, sıcaklık, güneş radyasyonu, atmosferik nem ve rüzgâr hızı gibi veriler, DesignBuilder® yazılımının veri tabanında mevcuttur. Bu veriler, Türkiye Meteoroloji Servisi'nin sağladığı verilerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır (İl ve İlçeler İstatistikleri, 2024). Ayrıca, seçilen şehirler için güneş radyasyonu yoğunlukları ve güneşlenme süresi verileri, Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan Türkiye Güneşlenme Potansiyeli Atlası'ndan (Türkiye Güneşlenme Potansiyeli Atlası, 2010) elde edilmiştir (Tablo 4.6.).

Tablo 4.6. Seçilen illerdeki güneş radyasyonu yoğunlukları ve güneşlenme süreleri

İller	Güneş radyasyonu yoğunluğu (kWh/m²)												Güneş-lenme süresi (saat/ gün)	Rakım
	1. ay	2. ay	3. ay	4. ay	5. ay	6. ay	7. ay	8. ay	9. ay	10. ay	11. ay	12. ay		
Antalya	75	91	138	160	197	208	215	196	163	123	82	66	8,4	39
İstanbul	41	56	95	129	166	180	184	161	127	83	50	36	5,9	40
Ankara	50	67	108	128	164	178	189	172	137	96	58	41	6,9	938
Van	82	102	142	163	197	215	218	201	163	120	82	69	7,9	1726
Erzurum	70	91	132	138	162	181	193	174	142	103	68	56	6,7	1890

Antalya, çok sıcak yazlar ve serin kışlar ile karakterize edilen bir subtropikal iklime sahiptir. En sıcak ay olan Temmuz'da ortalama maksimum sıcaklık 40 °C'ye ulaşırken, en soğuk ay olan Ocak'ta ortalama minimum sıcaklık 5 °C'dir. Yıllık ortalama sıcaklık 18,8 °C'dir. Bağıl nem yaz aylarında %40, kış aylarında ise %70 arasında değişmekte olup, yıllık ortalama %53,6'dır. Yıllık ortalama yağışlı gün sayısı 73,5 olup, yağışların büyük bir kısmı Kasım ile Mart ayları arasında görülmektedir (İl ve İlçeler İstatistikleri, 2024). "Lodos" ve "poyraz" gibi kuru ve güçlü rüzgârlar sıklıkla etkilidir. Yıllık toplam güneş radyasyonu şiddeti 1715 kWh/m², ortalama günlük güneşlenme süresi ise 8,4 saattir (Türkiye Güneşlenme Potansiyeli Atlası, 2010).

İstanbul, Akdeniz, Marmara ve Karadeniz iklimlerinin etkisi altındadır. En yüksek sıcaklıklar Temmuz ve Ağustos aylarında görülmekte olup, ortalama 30 °C'dir. En düşük sıcaklıklar, Ocak ve Şubat aylarında ortalama 3 °C olarak kaydedilmektedir. Yıllık ortalama sıcaklık 16,4 °C'dir. Ortalama yağışlı gün sayısı 116,5 olup, yağışların büyük çoğunluğu Ekim ile Mart ayları arasında gerçekleşmektedir (İl ve İlçeler İstatistikleri, 2024). Bağıl nem oranı %60 ile %80 arasında değişmekte olup, sonbahar ve kış aylarında daha yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Yıllık toplam güneş radyasyonu şiddeti 1389 kWh/m², ortalama günlük güneşlenme süresi ise 5,9 saattir. İstanbul ayrıca özellikle kış aylarında güçlü kuzeybatı rüzgârlarının etkisi altındadır (Türkiye Güneşlenme Potansiyeli Atlası, 2010).

Ankara, sıcak yazlar ve soğuk kışlarla karakterize edilen ılıman karasal bir iklime sahiptir. Yaz aylarında en yüksek sıcaklık 32,5 °C'ye kadar çıkarken, kış aylarında en düşük sıcaklık -10°C'ye kadar düşmektedir. Yıllık ortalama sıcaklık 12 °C'dir. Yıllık yağışlı gün sayısı 103,3 olup, en fazla yağış ilkbahar ve sonbahar aylarında görülmektedir (İl ve İlçeler İstatistikleri, 2024). Bağıl nem oranı kış aylarında yaklaşık

%60 iken, yaz aylarında %35 seviyelerine kadar düşmektedir. Yıllık toplam güneş radyasyonu şiddeti 1306 kWh/m², ortalama günlük güneşlenme süresi ise 6,9 saattir. Ankara aynı zamanda güçlü karasal rüzgârları ile bilinmektedir ve bu durum yapı kabuğunun ısı tutma ve enerji verimliliğini etkilemektedir (Türkiye Güneşlenme Potansiyeli Atlası, 2010).

Van ilinde, denizden uzak konumu ve yüksek rakımı nedeniyle aşırı sıcaklık değişimleri yaşanmaktadır. Yaz ayları sıcak ve kurak, kış ayları ise soğuk ve kar yağışlıdır. Kış aylarında kaydedilen en düşük sıcaklık -10 °C, yaz aylarında ise en yüksek sıcaklık 30 °C'dir. Yıllık ortalama sıcaklık 9,5 °C'dir. Ortalama yağışlı gün sayısı 93,4 olup, yağışların büyük kısmı ilkbahar ve kış başlarında görülmektedir (İl ve İlçeler İstatistikleri, 2024). Yıllık toplam güneş radyasyonu şiddeti 1493 kWh/m², ortalama günlük güneşlenme süresi ise 7,9 saattir. Van, aynı zamanda güçlü mevsimsel rüzgarların etkisi altında olup, bu durum yapılardaki termal konforu önemli ölçüde etkilemektedir (Türkiye Güneşlenme Potansiyeli Atlası, 2010).

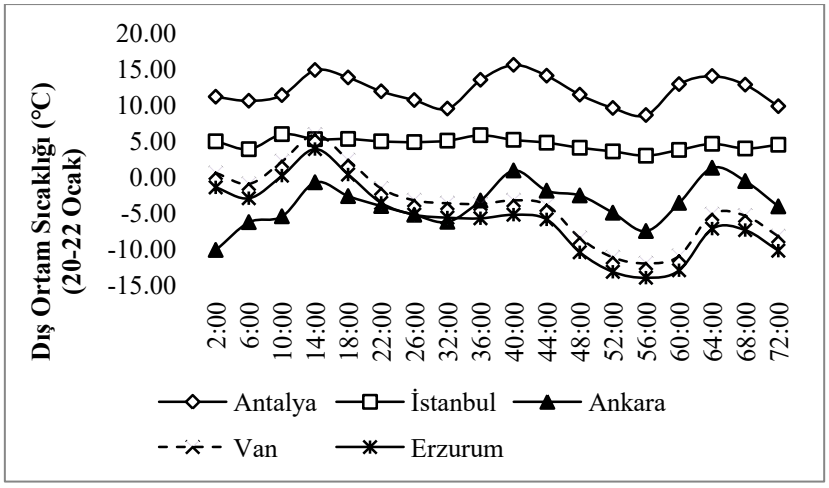
Erzurum, Türkiye'nin en soğuk iklim koşullarına sahip bölgesidir. Yazlar ılık ve kurak, kışlar ise çok soğuk ve karlıdır. En düşük sıcaklık -20 °C'ye kadar düşebilmekte olup, bu durum Erzurum'u ülkenin en sert iklimlerinden biri haline getirmektedir. Yıllık ortalama sıcaklık 5,8 °C'dir. Kar yağışı genellikle Ekim ayında başlamakta ve Nisan ayının sonlarına kadar devam etmektedir, bu durum bina yalıtım gereksinimlerini önemli ölçüde etkilemektedir. Yıllık yağışlı gün sayısı 122,1 olup, yağışların çoğu Ekim ile Nisan ayları arasında gerçekleşmektedir (İl ve İlçeler İstatistikleri, 2024). Yıllık toplam güneş radyasyonu şiddeti 1511 kWh/m², ortalama günlük güneşlenme süresi ise 6,7 saattir. Erzurum aynı zamanda güçlü ve sürekli rüzgarlar ile karakterize edilmekte olup, bu durum binalardaki ısı kaybını artırmaktadır (Türkiye Güneşlenme Potansiyeli Atlası, 2010).

4.5. Simülasyon Detayları

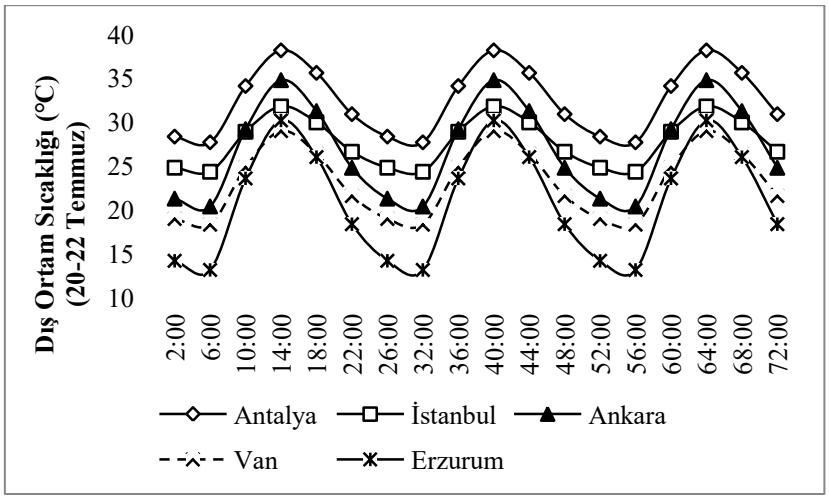
Simülasyon için DesignBuilder® yazılımı kullanılmıştır. FDM'nin faz değişim sürecini tam olarak simüle etmek için "Sonlu Farklar Hesaplama Yöntemi" olarak bilinen bir hesaplama tekniği seçilmiştir (U.S. Department of Energy, 2021).

Eğitim fonksiyonuna sahip binanın kullanımı 09.00-16.00 saatleri arasındadır. Binanın doluluk oranı 0.55 kişi/m² olarak belirlenmiştir. Metabolizma hızları, eğitim binasındaki kullanıcıların aktivitelerine bağlıdır. Ekipman kullanımı haftalık kullanım oranlarına göre simülasyona dahil edilmiştir. Çalışma saatlerinde 3,4 W/m²–100 lx aydınlatma dikkate alınmıştır.

Dış sıcaklık 18 ºC olduğunda, iç mekânda 24 ºC'lik konforlu bir sıcaklık sağlanabildiği bilinmektedir. Bundan dolayı herhangi bir yapının ısıtma veya soğutma gereksinimi genellikle 18 ºC'lik bir dış referans sıcaklığına göre hesaplanmaktadır (Menyhart ve Krarti, 2017). Temsili illere ait 20-22 Ocak ve 20-22 Temmuz tarihleri arasındaki dış ortam sıcaklığının zamana bağlı değişimi sırasıyla Şekil 4.1. ve Şekil 4.2.'te verilmiştir.



Şekil 4.1. Temsili illere ait 20-22 Ocak tarihlerindeki dış ortam sıcaklığı-zaman grafiği



Şekil 4.2. Temsili illere ait 20-22 Temmuz tarihlerindeki dış ortam sıcaklığı-zaman grafiği

Buna göre, bütün iklim bölgelerinde yer alan şehirlerdeki dış ortam sıcaklıkları kış aylarındaki referans sıcaklıkların altında ve yaz aylarındaki referans sıcaklıkların üzerindedir. Bu durumda, yeterli ısıl konforu sağlamak için ısıtma ve soğutma gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Kış ve yaz ayları maksimum ısıtma ve soğutma enerjisi gereksinimini simgelediğinden dolayı, araştırma, ısıtma ve soğutma enerjisi talebini azaltma hedefiyle kış ve yaz dönemi üzerine odaklanmıştır (Arumugam ve diğ., 2022).

Isıtma döneminde 19 ºC ve soğutma döneminde 26 ºC, ısıl konfor aralığı olarak seçilmiştir. Yani iç sıcaklık 19 ºC'nin altına düştüğünde ve 26 ºC'nin üstüne çıktığında, ısıtma ve soğutma sistemi devreye girmektedir. Binanın ısıtma, soğutma ve havalandırma ihtiyacı mekanik sistemlerle karşılanmaktadır. Isıtma gereksinimi doğalgaz, soğutma gereksinimi elektrik enerjisi ile karşılanmaktadır. Mekanik sistemler, sadece iç sıcaklık 19 ºC'nin altına düştüğünde ve 26 ºC'nin üstüne çıktığında devreye girmektedir ve simülasyonlarda doğal havalandırmanın etkisi "kapalı" olarak belirlenmiştir.

4.6. Hesaplama Yöntemleri

FDM ve IY entegrasyonunun yapı kabuğunun ısıl performansı üzerindeki etkileri, iç ortamın sıcaklık dalgalanmalarındaki azalma (SDA) değerleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. SDA hesaplanırken gündüz ve gece sıcaklıkları ayrı ayrı dikkate alınmıştır. Yani, her bir iklim bölgesinde en yoğun kış koşullarının hüküm sürdüğü 20-22 Ocak ve en yoğun yaz koşullarının hüküm sürdüğü 20-22 Temmuz tarihleri arasında, gündüz saatlerindeki üç günlük maksimum sıcaklıkların aritmetik ortalaması alınarak "pik bölgesindeki SDA değerleri" ve gece saatlerindeki üç günlük minimum sıcaklıkların aritmetik ortalaması alınarak "vadi bölgesindeki SDA değerleri" hesaplanmıştır. Mekanik sistemlerin yapı kabuğunun ısıl performansını etkileme ihtimali göz önünde bulundurularak, SDA hesaplaması sırasında mekanik sistemler kapalı tutulmuştur.

FDM ve IY'nın binaların enerji performansı üzerindeki etkileri, yıllık toplam ısıtma ve soğutma enerjisi tasarruf oranları dikkate alınarak belirlenmiştir. Isıtma ve soğutma enerjisi tasarrufu oranı (IETO) Denklem (4.1) uyarınca hesaplanmıştır.

$$IETO = \frac{\text{ET (referans)} - \text{ ET (FDM ve IY içeren)}}{\text{ET (referans)}} \text{ x } 100\ (\%) \tag{4.1}$$

ET, enerji tüketimini kWh cinsinden ifade etmektedir. IETO ve ET değerleri, mekanik sistemin %100 verimlilikle, kayıpsız bir şekilde 07.00 ile 24.00 arasında aktif ve 00.00 ile 07.00 arasında pasif olduğu durumlarda belirlenmiştir.

FDM-IY kombinasyonuna sahip duvar kesitlerinin ekonomik etkinliği hesaplanırken enerji maliyeti tasarrufu (EMT) ve geri ödeme süresi (GÖS) kriterleri dikkate alınmıştır. İlk olarak EMT Denklem (4.2) uyarınca hesaplanmıştır (M'hamdi ve diğ., 2022):

$$EMT = (ET_{yaz} * EM) + (ET_{kış} * DM) \tag{4.2}$$

ET_{yaz} ve $ET_{kış}$ (kWh), simüle edilen farklı duvar kesitlerine sahip binanın yıllık toplam soğutma ve ısıtma enerjisi tüketim miktarının referans duvara sahip binanın yıllık toplam soğutma ve ısıtma enerjisi tüketim miktarından farkını ifade etmektedir. EM elektrik maliyetini ve DM doğalgaz maliyetini sembolize etmektedir. TÜİK'e göre Türkiye'de yıllık elektrik maliyeti 139,1 kr/kWh ve yıllık doğalgaz maliyeti ise 29,5 kr/m^3'tür (TÜİK, 2022).

GÖS (yıl) ise Denklem (4.3) uyarınca hesaplanmıştır:

$$GÖS = \frac{[(M_{FDM} * V_{FDM}) + (K_{FDM} * İS_{FDM})] + [(M_{IY} * V_{IY}) + (K_{IY} * İS_{IY})]}{EMT} \tag{4.3}$$

M_{FDM} ve V_{FDM} sırasıyla FDM'nin maliyetini (TL/kg) ve hacmini (m^3), K_{FDM} kurulum maliyetini (TL/gün) ve $İS_{FDM}$ kurulum için gereken işçi sayısını sembolize etmektedir (Tablo 4.7.). M_{IY}, V_{IY}, K_{IY} ve $İS_{IY}$ ise sırasıyla IY'nin maliyetini, hacmini, kurulum maliyetini ve işçi sayısını ifade etmektedir. Kurulum maliyeti hesaplanırken 500x400x300 cm ebatlarına sahip referans binanın iki işçi tarafından bir günlük çalışma ile tamamlanabildiği, FDM-IY entegre edilen binanın ise yine iki işçi tarafından birer gün olmak üzere toplamda iki günlük çalışma ile tamamlanabildiği kabul edilmiştir.

Tablo 4.7. EMT ve GÖS hesaplamalarında kullanılan parametreler

Parametre	Değer
FDM Maliyeti (TL/kg)	10 mm: 22,94 20 mm: 45,88 30 mm: 68,82
IY (cam yünü) Maliyeti (TL/kg)	10 mm: 28,00 20 mm: 56,00 30 mm: 84,00
FDM ve IY (cam yünü) Hacim (m^3)	10 mm: 0,4602 20 mm: 0,9204 30 mm: 1,3806
FDM ve IY (cam yünü) Alan (m^2)	46,02
FDM Üretim Tesisi	Kocaeli (Coral)
IY (cam yünü) Üretim Tesisi	Adana (İzocam)
İşçi 1 Günlük Ücreti (TL/gün)	2500

5. BULGULAR

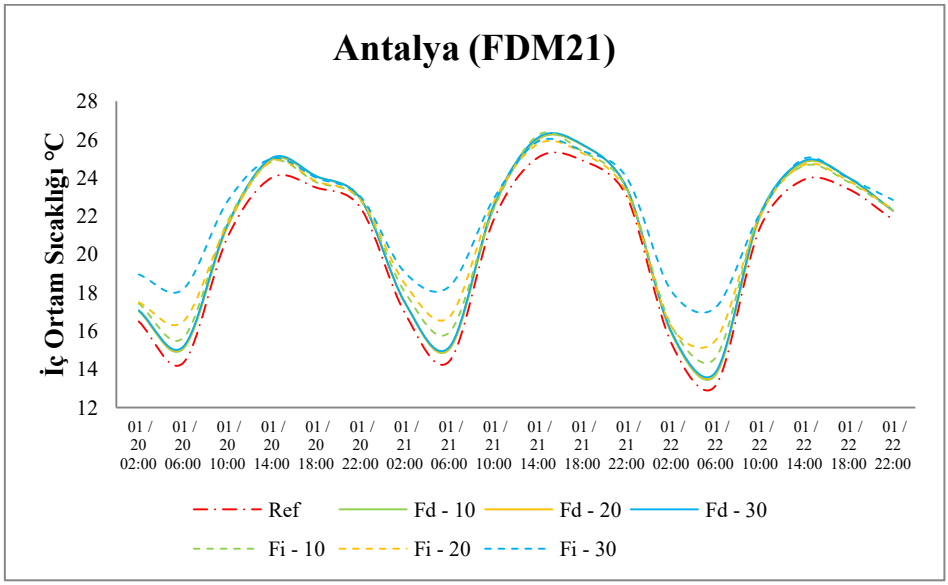
Metodoloji bölümünde detaylıca açıklanan simülasyon aşamalarının tamamlanması sonucunda elde edilen bulgular, "yalnızca FDM içeren" ve "FDM-IY içeren" yapı kabuklarına ait bulgular halinde iki temel başlık altında bu bölümde değerlendirilmektedir. Söz konusu değerlendirmede, kış ve yaz aylarında ilk olarak ısıl performansın etkisi, daha sonra enerji tasarruf oranlarının etkisi irdelenmiş; en son bölümde ise ekonomik değerlendirme yapılmıştır.

5.1. Yalnızca FDM İçeren Yapı Kabuğuna Ait Bulgular

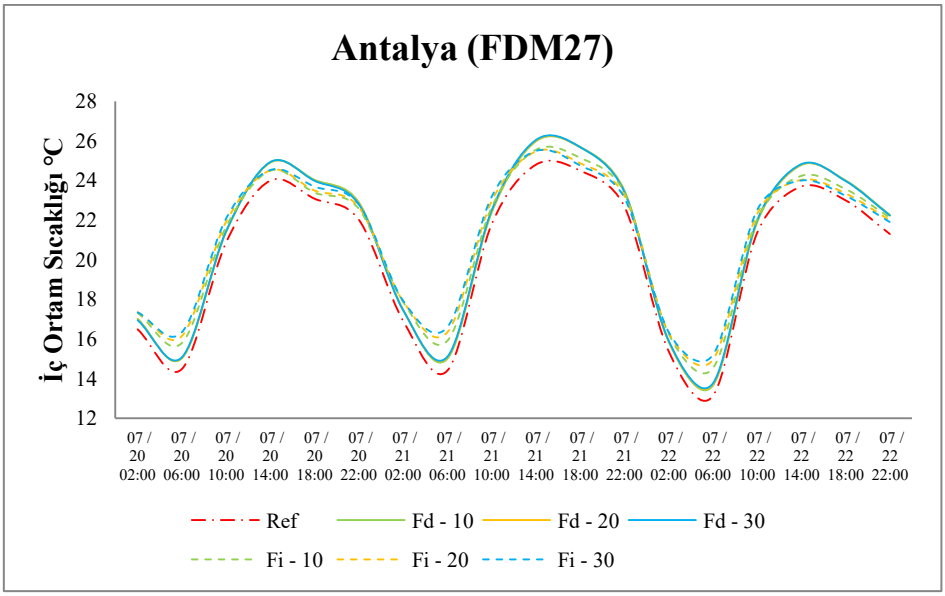
5.1.1. FDM Konumu, Kalınlığı ve Erime Sıcaklığının Isıl Performans Üzerindeki Etkisi

- Antalya'da referans ve yalnızca FDM entegre edilmiş binaların kış ayında iç ortam sıcaklık dalgalanması:

Yalnızca FDM entegre edilen yapı kabuğunun ısıl performansı üzerinde FDM'nin konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığının etkisini belirlemek amacıyla Antalya'da Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanmaları Şekil 5.1., ve Şekil 5.2.'de verilmiştir.



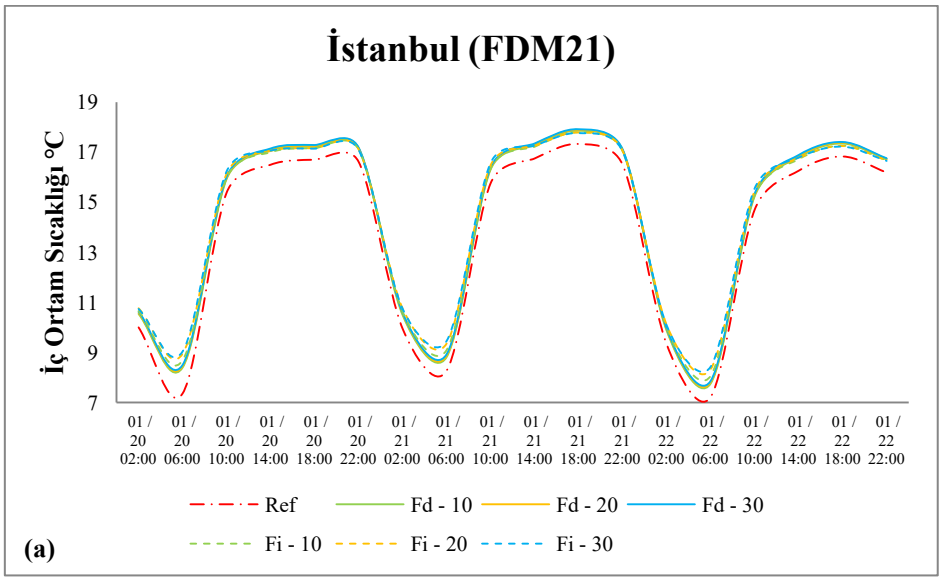
Şekil 5.1. Antalya'da referans ve yalnızca FDM-21 entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması



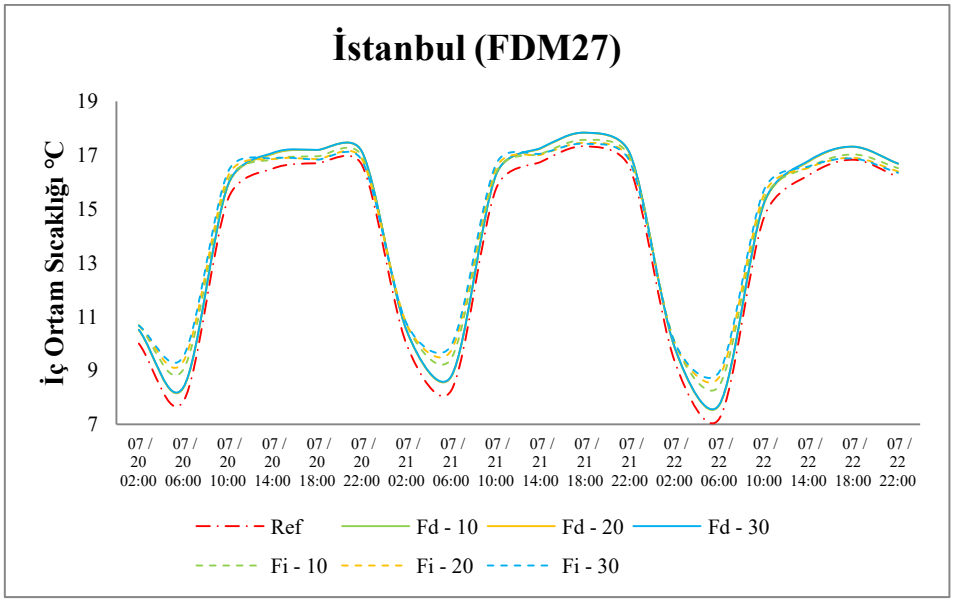
Şekil 5.2. Antalya'da referans ve yalnızca FDM-27 entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması

- İstanbul'da referans ve yalnızca FDM entegre edilmiş binaların kış ayında iç ortam sıcaklık dalgalanması:

Yalnızca FDM entegre edilen yapı kabuğunun ısıl performansı üzerinde FDM'nin konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığının etkisini belirlemek amacıyla İstanbul'da Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanmaları Şekil 5.3., ve Şekil 5.4.'te verilmiştir.



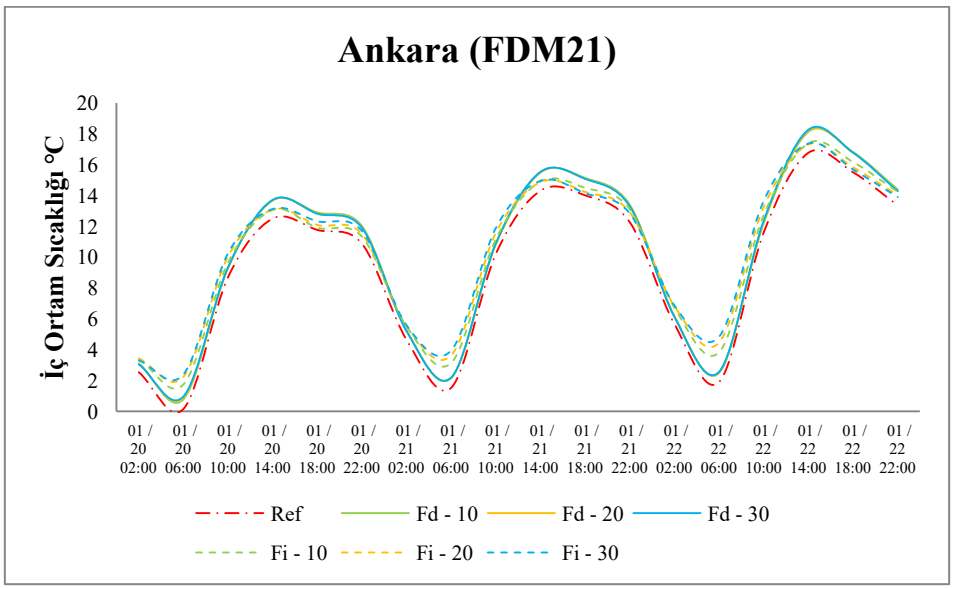
Şekil 5.3. İstanbul'da referans ve yalnızca FDM-21 entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması



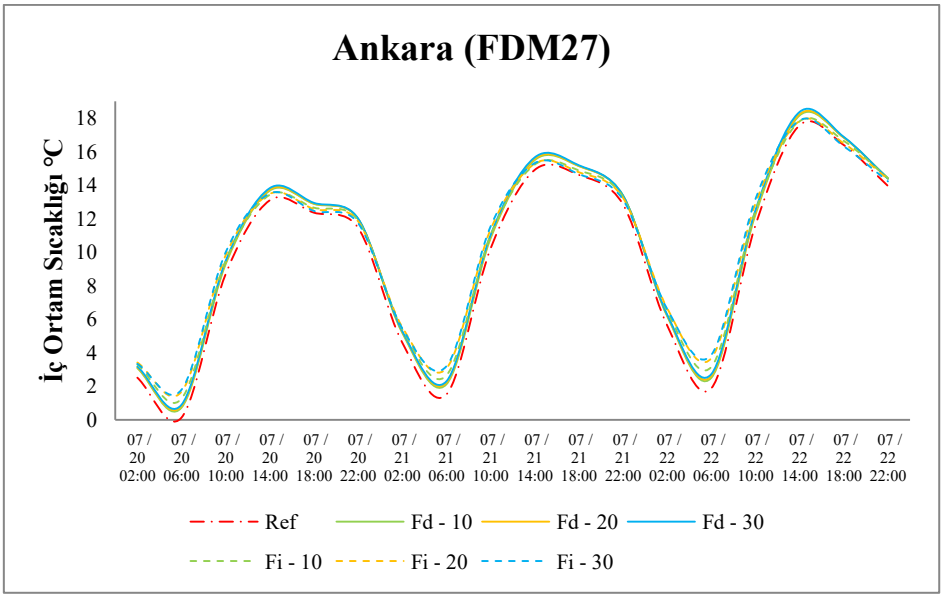
Şekil 5.4. İstanbul'da referans ve yalnızca FDM-27 entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması

- Ankara'da referans ve yalnızca FDM entegre edilmiş binaların kış ayında iç ortam sıcaklık dalgalanması:

Yalnızca FDM entegre edilen yapı kabuğunun ısıl performansı üzerinde FDM'nin konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığının etkisini belirlemek amacıyla Ankara'da Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanmaları Şekil 5.5., ve Şekil 5.6.'da verilmiştir.



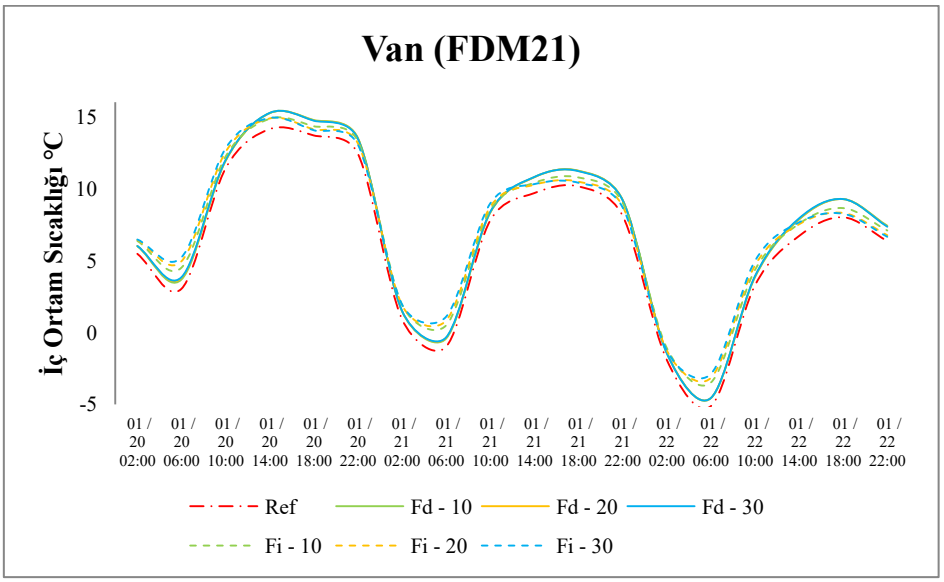
Şekil 5.5. Ankara'da referans ve yalnızca FDM-21 entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması



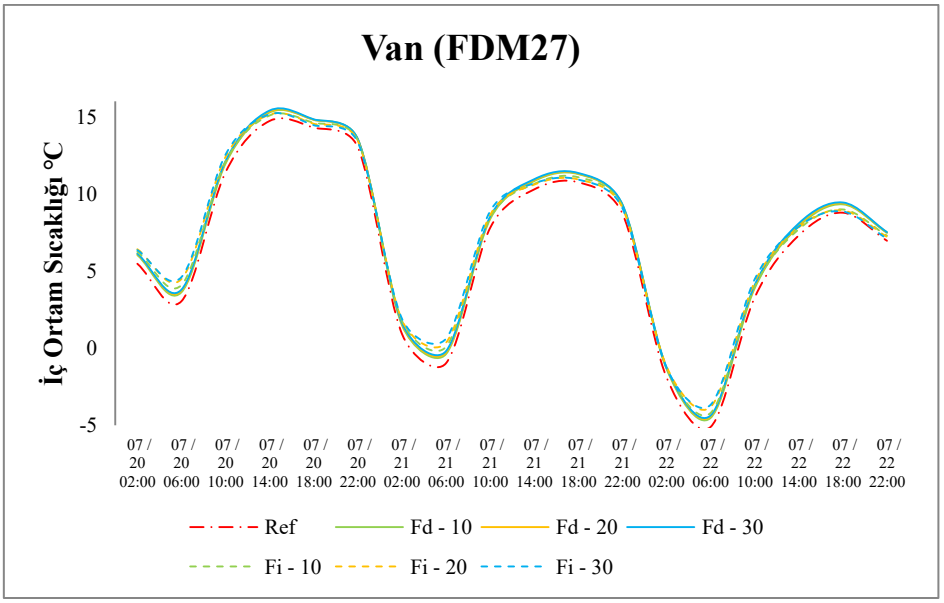
Şekil 5.6. Ankara'da referans ve yalnızca FDM-27 entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması

- Van'da referans ve yalnızca FDM entegre edilmiş binaların kış ayında iç ortam sıcaklık dalgalanması:

Yalnızca FDM entegre edilen yapı kabuğunun ısıl performansı üzerinde FDM'nin konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığının etkisini belirlemek amacıyla Van'da Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanmaları Şekil 5.7., ve Şekil 5.8.'de verilmiştir.



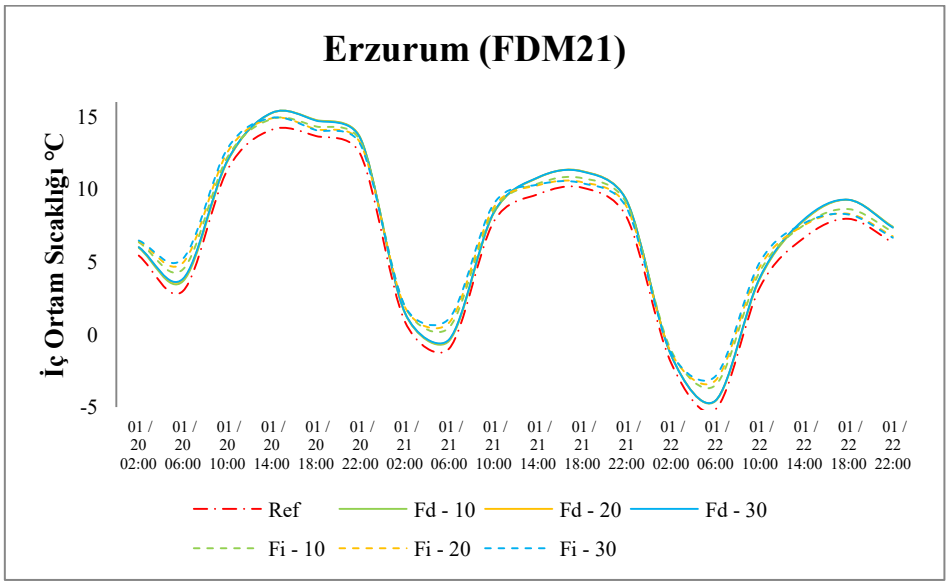
Şekil 5.7. Van'da referans ve yalnızca FDM-21 entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması



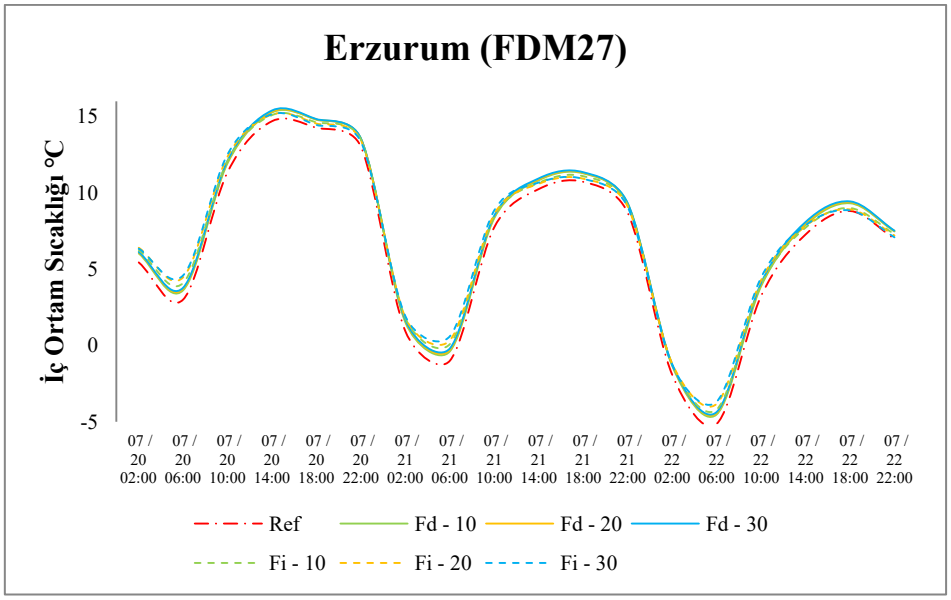
Şekil 5.8. Van'da referans ve yalnızca FDM-27 entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması

- Erzurum'da referans ve yalnızca FDM entegre edilmiş binaların kış ayında iç ortam sıcaklık dalgalanması:

Yalnızca FDM entegre edilen yapı kabuğunun ısıl performansı üzerinde FDM'nin konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığının etkisini belirlemek amacıyla Erzurum'da Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanmaları Şekil 5.9., ve Şekil 5.10.'da verilmiştir.



Şekil 5.9. Erzurum'da referans ve yalnızca FDM-21 entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması



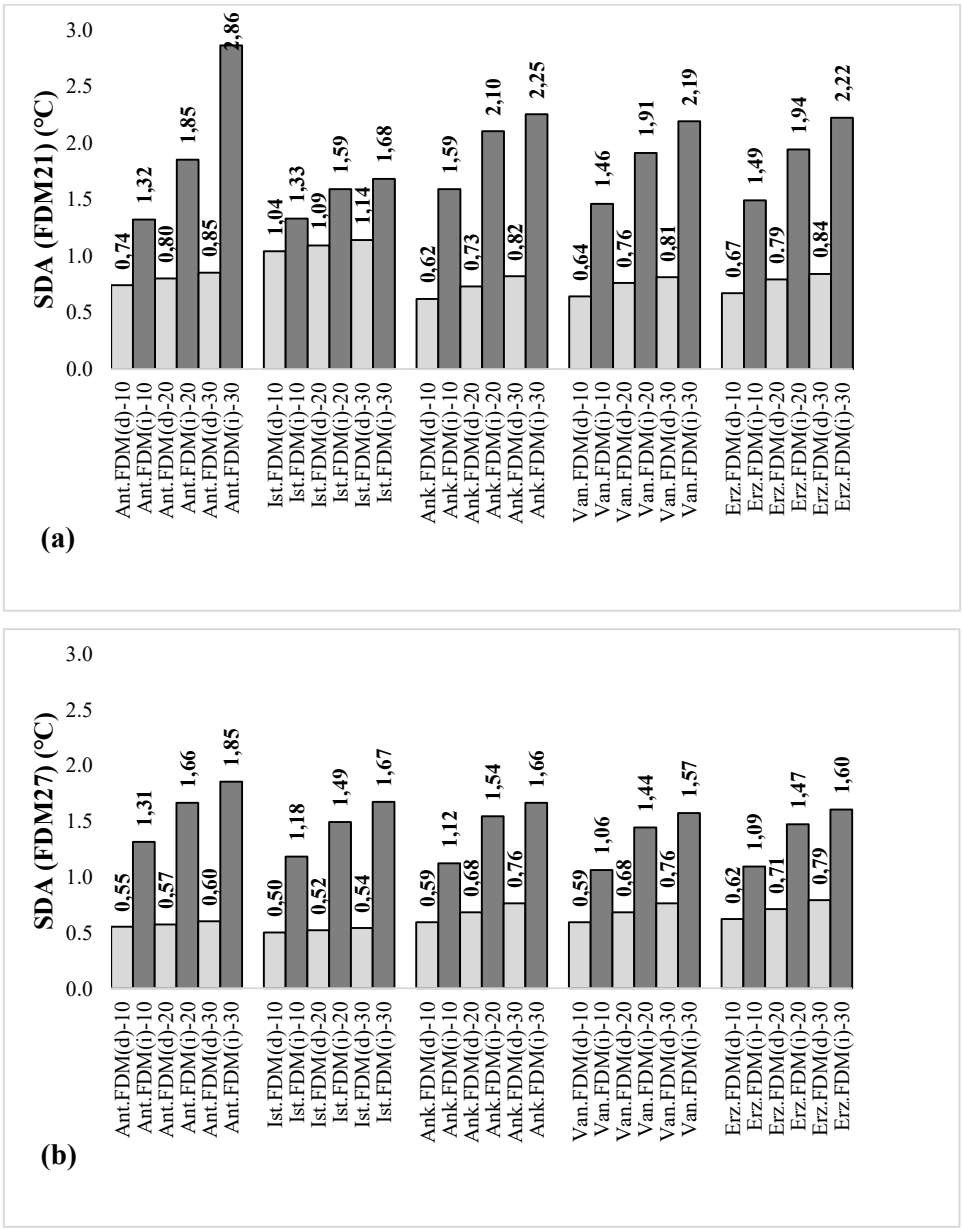
Şekil 5.10. Erzurum'da referans ve yalnızca FDM-27 entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması

Kış döneminde bütün iklim bölgelerinde en yüksek iç ortam sıcaklıkları 14.00-18.00 saatleri arasında ve en düşük iç ortam sıcaklıkları 06.00'da tespit edilmiştir. Ocak ayındaki üç pik gün için referans binanın en yüksek iç ortam sıcaklığı Antalya'da tespit edilmiştir (25,05 ºC) (Şekil 5.1.). Bunu sırasıyla İstanbul (17,33 ºC) (Şekil 5.2.), Ankara (16,77 ºC) (Şekil 5.3.), Van (14,12 ºC) (Şekil 5.4.) ve Erzurum (14,09 ºC) (Şekil 5.5.) takip etmektedir. Güneş ışınımının maksimum olduğu öğle saatlerinde referans binaların iç ortam sıcaklıkları, FDM entegre edilmiş binalarınkine nazaran daha düşüktür. Aynı tarihlerde, referans yapıların gece saatlerindeki iç ortam sıcaklıklarının en düşük değeri Van ve Erzurum'da tespit edilmiştir (sırasıyla -5,12 ve -5,15 ºC). Antalya, İstanbul ve Ankara'daki referans yapıların en düşük iç ortam sıcaklıkları ise sırasıyla 13,13 ºC, 7,22 ºC ve 0,15 ºC'dir. FDM uygulamanın binanın ısıl konforunu ne yönde etkilediğini sayısal olarak ortaya koyarak daha iyi irdeleyebilmek amacıyla, iç ortam sıcaklık dalgalanmalarındaki azalma miktarı hesaplanmış ve elde edilen bulgular bir sonraki bölümde verilmiştir.

- Referans ve yalnızca FDM entegre edilmiş binaların kış ayında iç ortam sıcaklık dalgalanmalarında azalma kabiliyeti:

Referans yapının duvar kesitine iç ya da dış bölgeden FDM entegre edilmesi durumunda yapıların iç ortam sıcaklık dalgalanmasında azalma (SDA) gözlenmektedir. Yani, FDM,

dış ortamdaki ani sıcaklık değişimlerinin iç ortamı etkilemesini önleyerek kullanıcıların iç ortamda ısıl açıdan daha konforlu hissetmesine olanak tanımaktadır. Literatürde FDM entegrasyonu ile binanın iç ortam sıcaklığının kış döneminde 3-4 ºC'ye kadar arttırıldığı ve yaz döneminde 7 ºC'ye kadar azaltıldığı tespit edilmiştir (Derradji ve diğ., 2017). Bu bağlamda, Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde yer alan FDM entegre edilmiş eğitim binalarında FDM konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığının iç ortamdaki sıcaklık dalgalanmalarını azaltma (SDA) kabiliyeti üzerindeki etkileri kış dönemi için araştırılmış ve Şekil 5.11.'de verilmiştir.



Şekil 5.11. FDM konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığının kış döneminde iç ortamın SDA değeri üzerindeki etkileri: (a) FDM-21 ºC; (b) FDM-27 ºC

FDM'nin duvar kesitindeki konumu, gizli ısı aktivasyonunun verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için kritik bir parametredir ve optimum konum, iklim koşulları, iç ortam sıcaklıkları, duvar bileşenlerinin termofiziksel özellikleri ve duvarın yönelimi gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Uygun bir FDM konumu, FDM'nin günlük faz değişim döngüsü sırasında tamamen erimesini ve katılaşmasını sağlamalıdır (Izquierdo-Barrientos ve diğ., 2012; Al-Absi ve diğ., 2020). Şekil 5.11.(a)'ya göre, sıcak-nemli iklimi temsil eden Antalya'da kış döneminde en yüksek sıcaklıkların yaşandığı öğle saatlerinde (pik bölgesinde) duvarın dış bölgesine entegre edilen (FDM(d)) 10, 20 ve 30 mm kalınlıktaki FDM-21 referans mekâna nazaran sırasıyla 0,94, 0,98 ve 1,03 ºC SDA sağlamıştır. Aynı malzemenin duvarın iç bölgesine entegre edilmesiyle (FDM(i)) sırasıyla 0,85, 0,88 ve 1,00 ºC SDA sağlanmıştır. Ilımlı-nemli iklim özelliklerine sahip İstanbul'da 10, 20 ve 30 mm FDM-21 dış bölgeye entegre edildiğinde sırasıyla 0,57, 0,61 ve 0,65 ºC SDA sağlarken iç bölgeye yerleştirildiğinde ise iç ortam sıcaklığını dengede tutmada daha az başarılı olmuştur (0,50, 0,55 ve 0,57 ºC SDA). Benzer şekilde, dış bölgede yer alan 10, 20 ve 30 mm FDM-21 Ankara'da 1,17, 1,19 ve 1,22 ºC, Van'da 1,11, 1,13 ve 1,15 ºC ve Erzurum'da 1,14, 1,16 ve 1,18 ºC SDA sağlamıştır. İç bölgeye yerleştirilen FDM-21 ise Ankara (0,57, 0,59 ve 0,62 ºC), Van (0,72, 0,75 ve 0,78 ºC) ve Erzurum'da (0,75, 0,78 ve 0,81 ºC) SDA bakımından çok daha düşük etkinlik göstermiştir. Kış döneminde, en düşük sıcaklıkların tespit edildiği gece saatlerinde (vadi bölgesinde) iç ortam sıcaklığındaki değişim trendi gündüz saatlerindeki değişimin tam tersidir. Antalya'da gece saatlerinde duvarın dış bölgesine entegre edilen (FDM(d)) 10, 20 ve 30 mm kalınlıktaki FDM-21 referans mekâna nazaran sırasıyla 0,74, 0,80 ve 0,85 ºC SDA sağlarken, iç bölgede yer alan FDM-21 ise sırasıyla 1,32, 1,85 ve 2,86 ºC SDA sağlamıştır. İstanbul'da 10, 20 ve 30 mm FDM-21 dış bölgeye entegre edildiğinde sırasıyla 1,04, 1,09 ve 1,14 ºC SDA sağlarken iç bölgeye yerleştirildiğinde ise (1,33, 1,59 ve 1,68 ºC) iç ortam sıcaklığını dengede tutmada daha fazla başarılı olmuştur. Benzer şekilde, dış bölgede yer alan 10, 20 ve 30 mm FDM-21 gece saatlerinde Ankara'da 0,62, 0,73 ve 0,82 ºC, Van'da 0,64, 0,76 ve 0, 81 ºC ve Erzurum'da 0,67, 0,79 ve 0,84 ºC SDA beraberinde getirmiştir. İç bölgeye yerleştirilen FDM-21 ise Ankara (1,59, 2,10 ve 2,25 ºC), Van (1,46, 1,91 ve 2,19 ºC) ve Erzurum'da (1,49, 1,94 ve 2,22 ºC) SDA bakımından çok daha yüksek etkinlik göstermiştir. FDM-21 yerine FDM-27 kullanılması durumunda, FDM konumunun gece

saatlerindeki SDA üzerindeki etkinliği benzer bir değişim trendi göstermiştir (Şekil 5.11.(b)).

Yalnızca FDM entegre edilmiş duvar kesitlerinde SDA açısından kış dönemi için ideal FDM konumu dış katmandadır. Dolayısıyla kış koşullarının daha yoğun sürdüğü iklim bölgelerinde FDM'yi dış katmana yerleştirmek mümkündür. Ancak konu yalnızca SDA etkinliği bakımından değerlendirilmemeli, enerji performansı da göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, FDM erime sıcaklığının bu sonuçları etkileyebileceği de unutulmamalıdır.

Şekil 5.11.(b)'ye göre, kış döneminde, Antalya'da duvarın dış bölgesine entegre edilen 10, 20 ve 30 mm kalınlıktaki FDM-27 öğle saatlerinde 0,91, 0,93 ve 0,95 ºC SDA sağlamıştır. Aynı kalınlıkta FDM-27'nin duvar kesitinin iç bölgesine yerleştirilmesiyle sırasıyla 0,50, 0,52 ve 0,54 ºC SDA elde edilmiştir. Duvarın dış bölgesindeki FDM-27 İstanbul (0,54, 0,56 ve 0,58 ºC), Ankara (0,57, 0,64 ve 0,72 ºC), Van (0,56, 0,61 ve 0,68 ºC) ve Erzurum'da (0,59, 0,64 ve 0,71 ºC) öğle saatlerinde iç bölgedeki FDM-27'ye nazaran (İstanbul'da 0,33, 0,35 ve 0,38; Ankara'da 0,33, 0,37 ve 0,41; Van'da 0,37, 0,41 ve 0,44; Erzurum'da 0,40, 0,44 ve 0,47) daha yüksek SDA sağlamıştır.

FDM kalınlığı da SDA üzerinde etkili bir diğer parametredir. Kış döneminde, gerek 21 ºC gerekse 27 ºC FDM entegre edilmiş yapılarda bütün iklim bölgelerinde FDM kalınlığının 10 mm'den sırasıyla 20 ve 30 mm'e arttırılmasına bağlı olarak SDA kademeli bir artış sergilemektedir. Çünkü FDM kalınlığı (hacmi) arttığında sistemde absorbe edilen ve depolanan toplam ısı enerjisi miktarı artmaktadır. Maksimum SDA sağlayarak iç mekânın ısıl konforunu artıran ve mekanik ısıtma ihtiyacını azaltan ideal FDM kalınlığının 30 mm olduğu belirlenmiştir. Çünkü FDM kalınlığı arttıkça, duvar kesitinde emilen ve depolanan toplam ısı enerjisi de artmaktadır.

Literatürde çeşitli optimizasyon çalışmaları tarafından önerilen FDM kalınlıkları birkaç milimetreden birkaç santimetreye kadar farklılık göstermektedir (Chen ve diğ., 2008). Pekin (Çin)'in karasal muson iklimi için 30 mm FDM (Chen ve diğ., 2008), Vuhan (Çin)'in sıcak-nemli iklim koşullarında 30 mm FDM (Zhu ve diğ., 2015), Xi'an (Çin)'in sıcak-nemli iklim özellikleri için 40 mm FDM (Zhang ve diğ., 2024), Tunus'un farklı bölgeleri için (Susa, Bizerte, Tabarka, Tuzer) 40 mm FDM (Dardouri ve diğ., 2023),

Johannesburg (Güney Afri-ka)'nın ılıman iklim koşullarında 12,5 mm (Saffari ve diğ., 2017), Orta Doğu Bölgesinde hem sıcak ve hem de soğuk iklim bölgelerinde 20 mm FDM (Afrand ve Dehkordi, 2022) ideal kalınlıklar olup kış döneminde en yüksek enerji tasarrufu vermektedir. İklim koşulları, bina fonksiyonu, bina kabuğu özellikleri, FDM türü, kalınlığı ve erime sıcaklığı gibi faktörlere bağlı olarak, yaz döneminde ise 10 mm FDM kullanılarak 0,02-2,41 ºC SDA, 70 mm FDM kullanılarak ise 1,76-5 ºC SDA elde edilmiştir (Qu ve diğ., 2021).

Bu çalışmada en yüksek verimliliği sağlayan 30 mm FDM(i), 1,27-2,56 ºC SDA sağlamış olup, literatürdeki verilerle uyumludur. Daha kalın FDM kullanımıyla daha yüksek SDA oranları elde edilebilir. Ancak FDM kalınlığının artırılmasının maliyetleri de artıracağı göz önünde bulundurulmalı ve kalınlık-termofiziksel performans-maliyet optimizasyonu yapılmalıdır.

Enerji tasarrufunu en üst düzeye çıkarmak için optimum erime sıcaklığı belirli iklim koşulları dikkate alınarak seçilmelidir (Adilkhanova ve diğ., 2021). Kış dönemi için Şekil 5.11.(a) ve 5.11.(b) karşılaştırıldığında, FMD'nin konumundan bağımsız olarak 21 ºC erime sıcaklığına sahip (FDM-21)'nin FDM-27'ye nazaran daha yüksek oranda SDA sağladığı anlaşılmaktadır. Örneğin, iç bölgeye entegre edilen 30 mm FDM-21 vadi bölgesinde Antalya, İstanbul, Ankara, Van ve Erzurum'da sırasıyla 2,86, 1,78, 2,25, 2,19 ve 2,22 ºC SDA sağlarken aynı kalınlıktaki FDM-27 sırasıyla 1,85, 1,67, 1,66, 1,57 ve 1,60 ºC SDA'yı beraberinde getirmiştir. İç bölgeye entegre edilen 30 mm FDM-21 pik bölgesinde Antalya, İstanbul, Ankara, Van ve Erzurum'da (sırasıyla 1,00, 0,57, 0,62, 0,78 ve 0,81 ºC) aynı kalınlıktaki FDM-27'e nazaran (sırasıyla 0,54, 0,38, 0,41, 0,44 ve 0,47 ºC) yaklaşık 2 kat daha yüksek performans sergilemektedir.

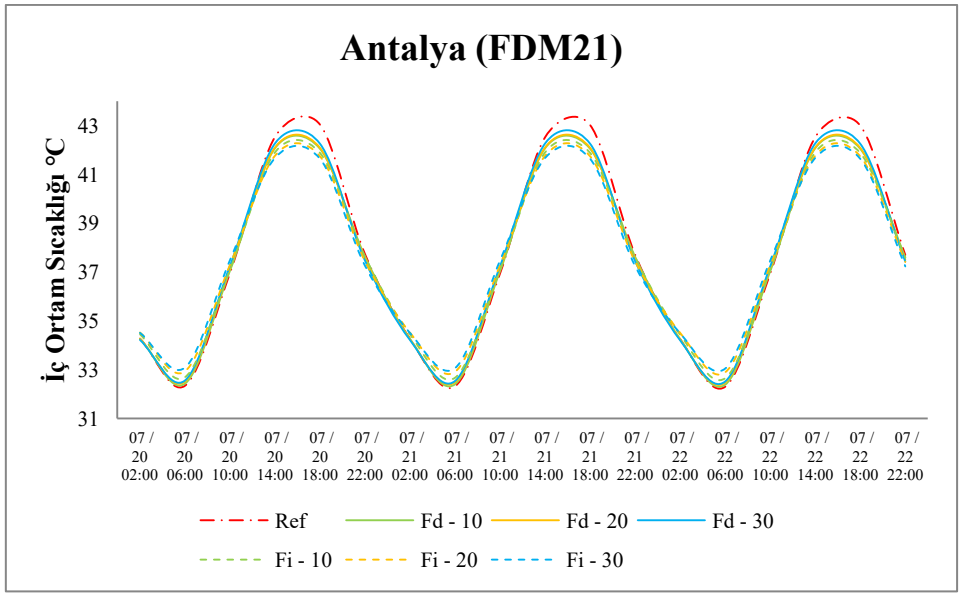
Kışın FDM güneşli saatlerde erirken güneşten sağladığı enerjiyi depolamakta ve sıcaklık azaldığında katılaşma sürecine girerek depoladığı enerjiyi serbest bırakmaktadır. Bu nedende FDM'nin erime sıcaklığı kışın güneşli saatlerde tamamen eriyebilecek kadar düşük olmalıdır.

Isıtma gereksinimi baskın olan iklimlerde ideal FDM erime sıcaklığı genellikle 20 ºC'ye yakındır. Ilımlı iklim özelliklerine sahip bölgelerde ideal erime sıcaklığı genellikle 18 ve 22 ºC arasındadır (Saffari ve diğ., 2017). Kış döneminde iç ortamın ısıl konforunu

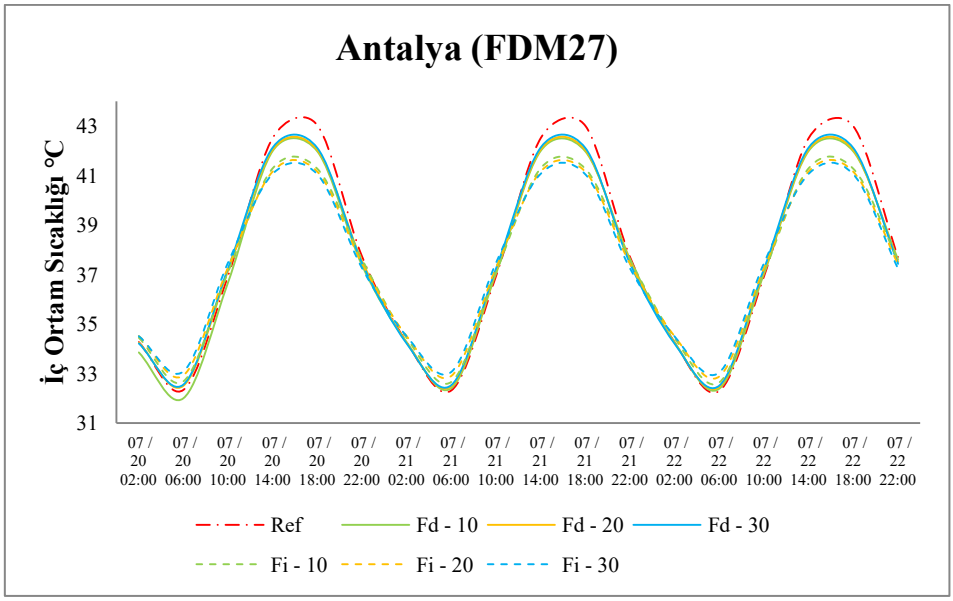
arttıran ve önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlayan ideal FDM erime sıcaklıkları Yeni Güney Galler (Avustralya)'nın ılıman iklim özellikleri için (Mohseni ve Tang, 2021), Pekin (Çin)'in karasal muson iklimi için (Zhou ve diğ., 2007) ve Tunus'un farklı bölgelerinde (Susa, Bizerte, Tabarka, Tuzer) 21 ºC (Dardouri ve diğ., 2023), nemli subtropikal iklime sahip Şangay (Çin)'de 22 ºC (Wang ve diğ., 2020), Orta Doğu'nun soğuk bölgelerinde 22 ºC ve sıcak bölgelerinde 24 ºC (Afrand ve Dehkordi, 2022), tropikal ve muson karışımı bir iklime sahip olan Güney Kore'de 23-24 ºC (Park ve diğ., 2019) olarak tespit edilmiştir. Türkiye'nin iklim özelliklerinde ideal FDM erime sıcaklığı araştırıldığında, ılımlı-nemli iklim özelliklerine sahip İstanbul için 21 ºC (Terhan ve İlgar, 2023), sıcak-nemli iklim özelliklerine sahip İzmir için 23 ºC (İlgar ve Terhan, 2024) olarak tespit edilmiştir.

- Antalya'da referans ve yalnızca FDM entegre edilmiş binaların yaz ayında iç ortam sıcaklık dalgalanması:

Yalnızca FDM entegre edilen yapı kabuğunun ısıl performansı üzerinde FDM'nin konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığının etkisini belirlemek amacıyla Antalya'da Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanmaları Şekil 5.12. ve Şekil 5.13.'te verilmiştir.



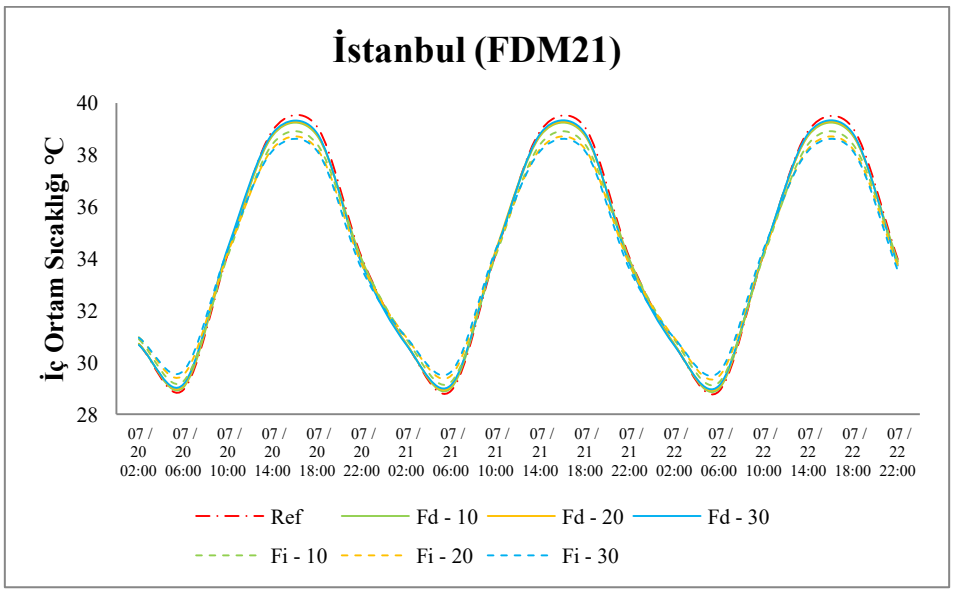
Şekil 5.12. Antalya'da referans ve yalnızca FDM-21 entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması



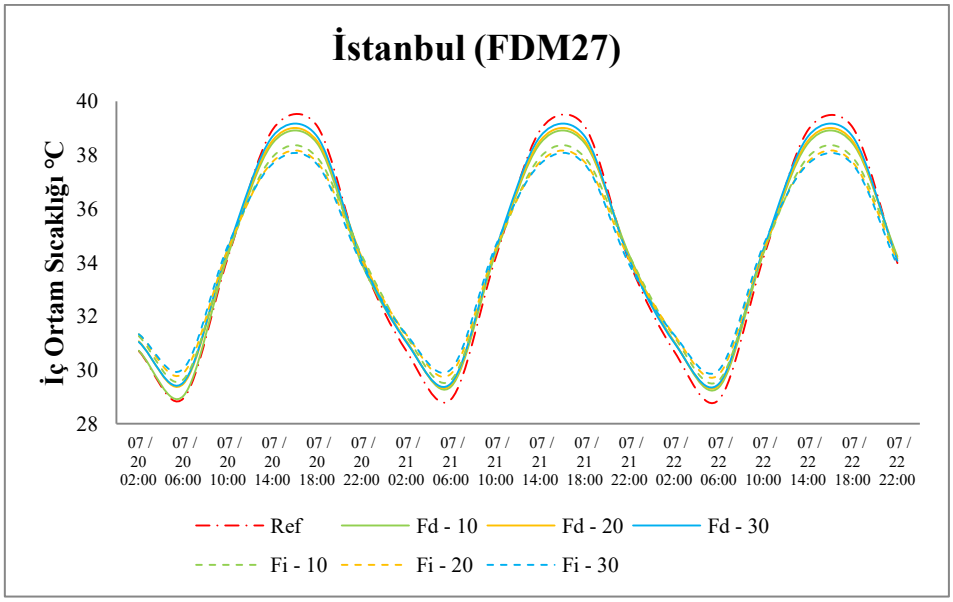
Şekil 5.13. Antalya'da referans ve yalnızca FDM-27 entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması

- İstanbul'da referans ve yalnızca FDM entegre edilmiş binaların yaz ayında iç ortam sıcaklık dalgalanması:

Yalnızca FDM entegre edilen yapı kabuğunun ısıl performansı üzerinde FDM'nin konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığının etkisini belirlemek amacıyla İstanbul'da Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanmaları Şekil 5.14. ve Şekil 5.15.'te verilmiştir.



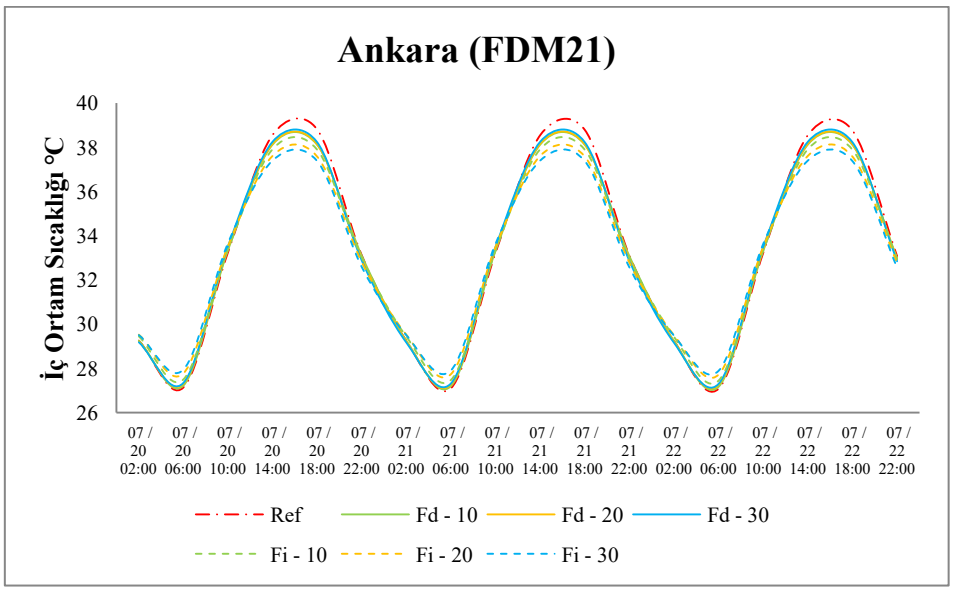
Şekil 5.14. İstanbul'da referans ve yalnızca FDM-21 entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması



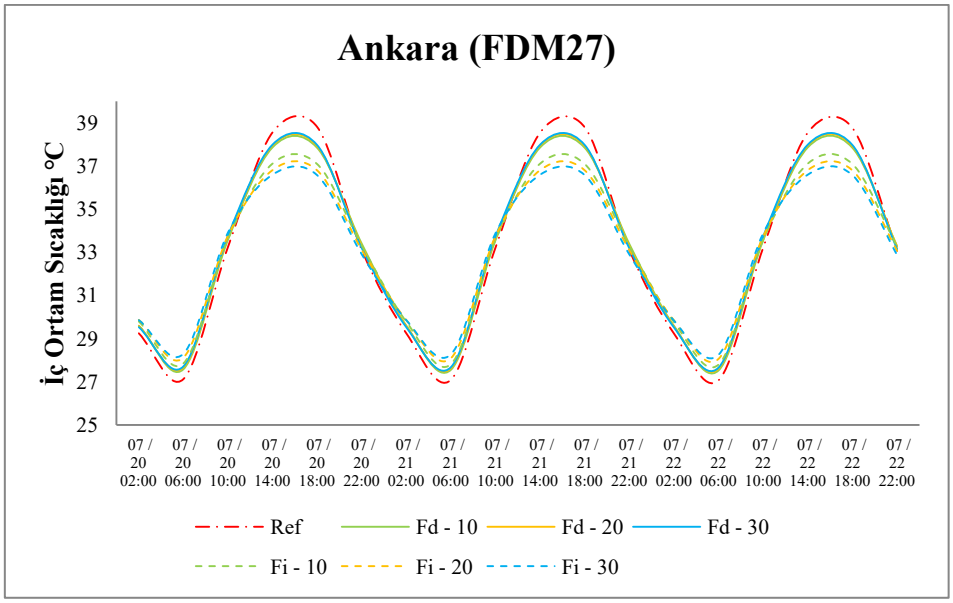
Şekil 5.15. İstanbul'da referans ve yalnızca FDM-27 entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması

- Ankara'da referans ve yalnızca FDM entegre edilmiş binaların yaz ayında iç ortam sıcaklık dalgalanması:

Yalnızca FDM entegre edilen yapı kabuğunun ısıl performansı üzerinde FDM'nin konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığının etkisini belirlemek amacıyla Ankara'da Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanmaları Şekil 5.16. ve Şekil 5.17.'de verilmiştir.



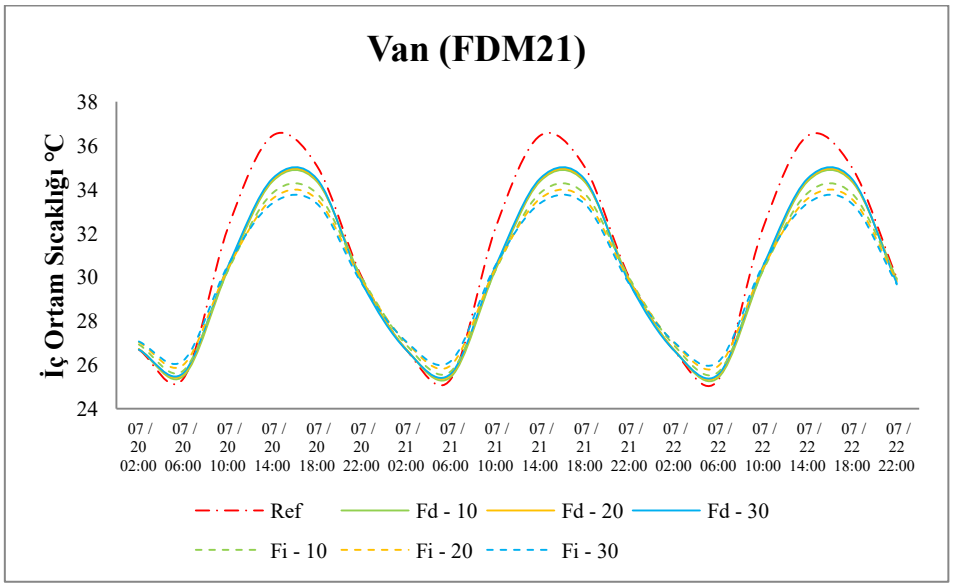
Şekil 5.16. Ankara'da referans ve yalnızca FDM-21 entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması



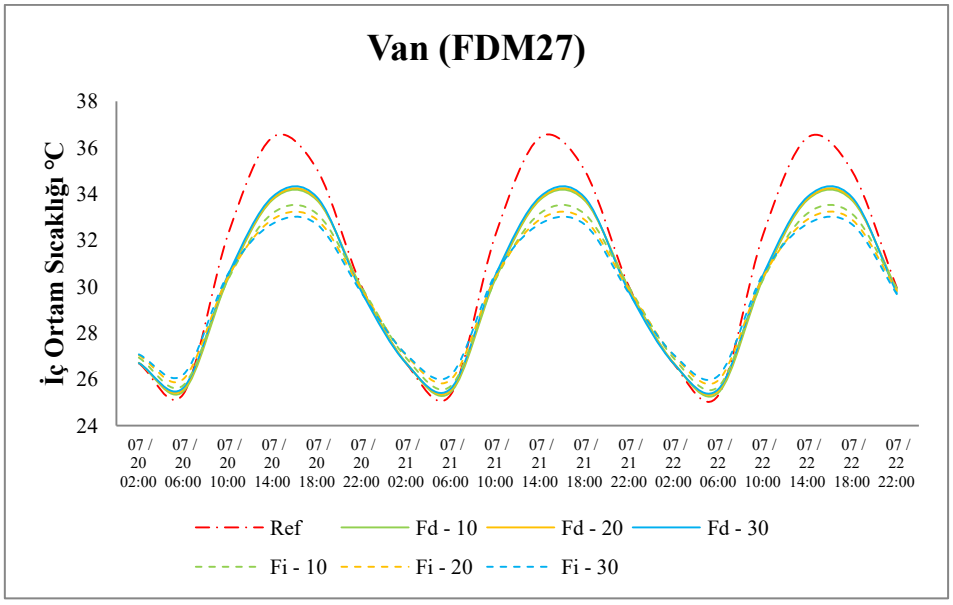
Şekil 5.17. Ankara'da referans ve yalnızca FDM-27 entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması

- Van'da referans ve yalnızca FDM entegre edilmiş binaların yaz ayında iç ortam sıcaklık dalgalanması:

Yalnızca FDM entegre edilen yapı kabuğunun ısıl performansı üzerinde FDM'nin konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığının etkisini belirlemek amacıyla Van'da Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanmaları Şekil 5.18. ve Şekil 5.19.'da verilmiştir.



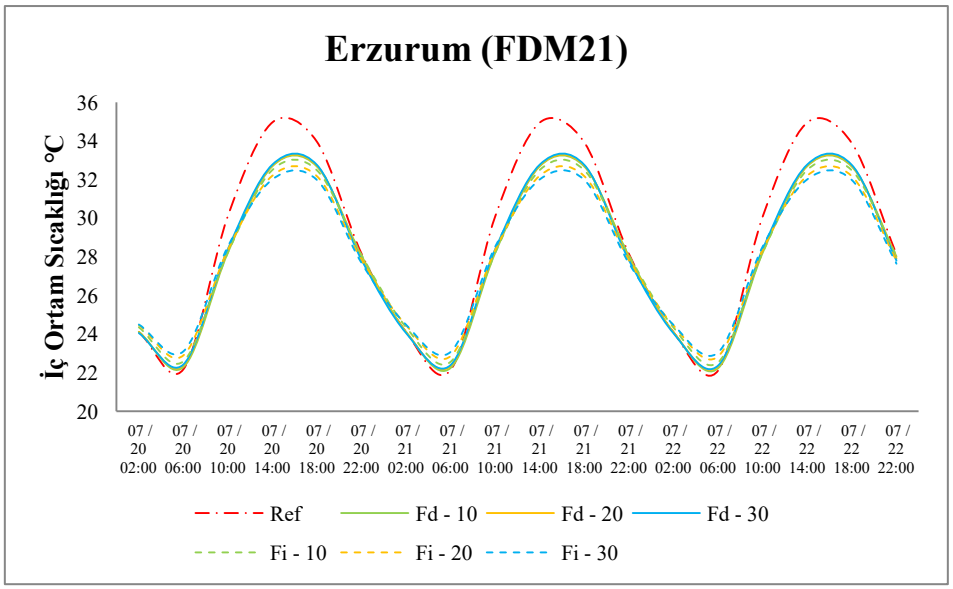
Şekil 5.18. Van'da referans ve yalnızca FDM-21 entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması



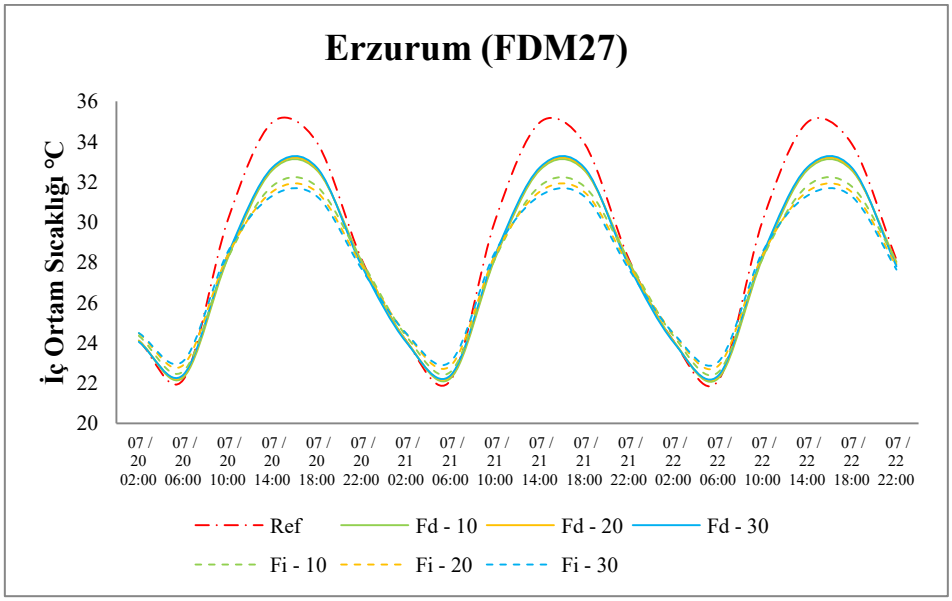
Şekil 5.19. Van'da referans ve yalnızca FDM-27 entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması

- Erzurum'da referans ve yalnızca FDM entegre edilmiş binaların yaz ayında iç ortam sıcaklık dalgalanması:

Yalnızca FDM entegre edilen yapı kabuğunun ısıl performansı üzerinde FDM'nin konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığının etkisini belirlemek amacıyla Erzurum'da Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanmaları Şekil 5.20. ve Şekil 5.21.'de verilmiştir.



Şekil 5.20. Erzurum'da referans ve yalnızca FDM-21 entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması



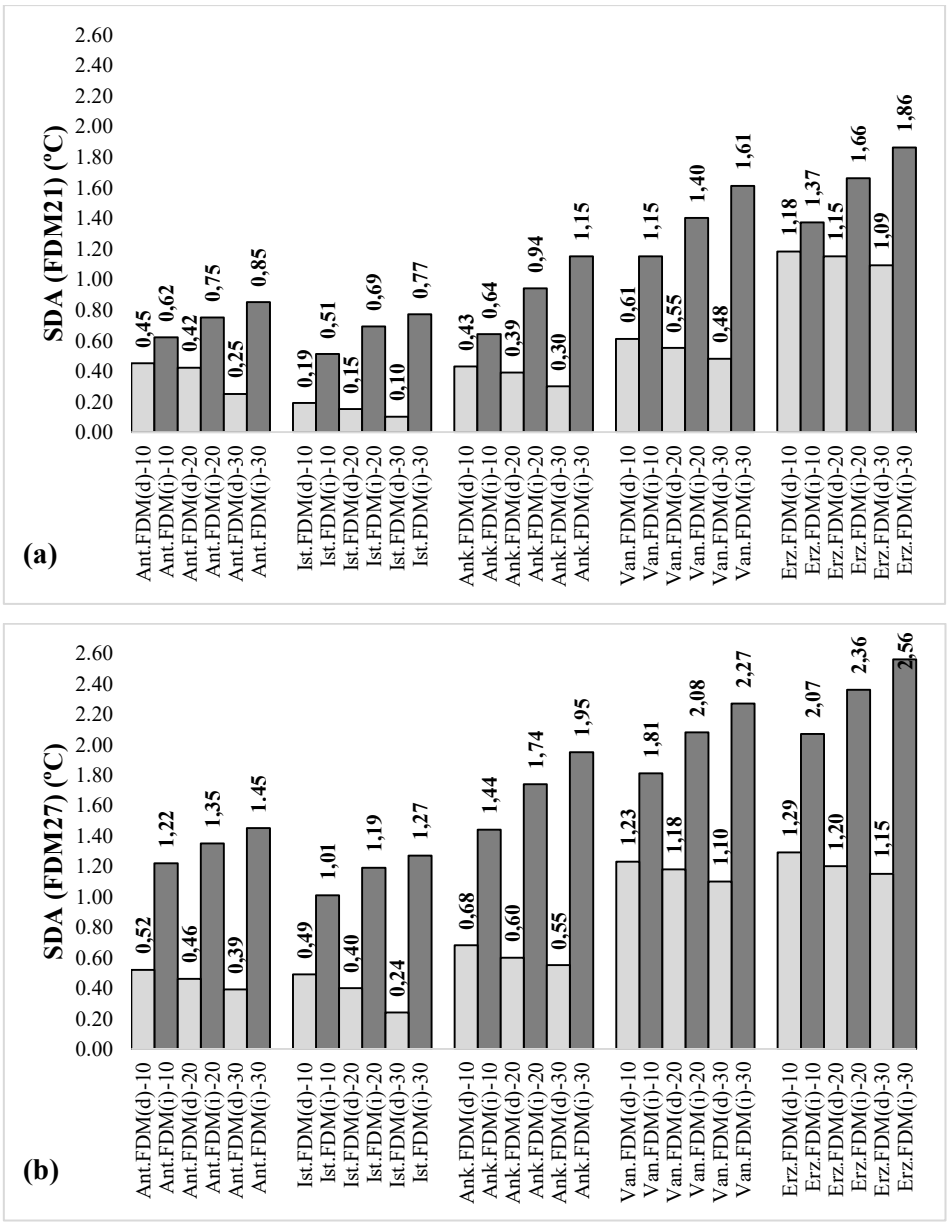
Şekil 5.21. Erzurum'da referans ve yalnızca FDM-27 entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması

Yaz döneminde bütün iklim bölgelerinde en yüksek iç ortam sıcaklıkları 14.00-16.00 saatleri arasında tespit edilmiştir. Temmuz ayındaki üç pik gün için referans binada en yüksek iç ortam sıcaklığı 43 ºC ile Antalya'da tespit edilmiştir. Bu durumu sırasıyla İstanbul (39 ºC), Ankara (38,5 ºC), Van (36,5 ºC) ve Erzurum (34,9 ºC) takip etmiştir. Güneş ışınımının maksimum olduğu öğle saatlerinde referans binaların iç ortam sıcaklıkları, FDM entegre edilmiş binalarınkine nazaran daha yüksektir. Aynı tarihlerde, referans yapıların gündüz saatlerindeki iç ortam sıcaklıklarının en yüksek değeri Antalya ve İstanbul'da tespit edilmiştir (sırasıyla 42,53 ve 38,95 ºC). Ankara, Van ve Erzurum'daki referans yapıların en yüksek iç ortam sıcaklıkları ise sırasıyla 38,8 ºC, 36,45 ºC ve 34,96 ºC'dir. FDM uygulamanın binanın ısıl konforunu ne yönde etkilediğini sayısal olarak ortaya koyarak daha iyi irdeleyebilmek amacıyla, iç ortam sıcaklık dalgalanmalarındaki azalma miktarı hesaplanmış ve elde edilen bulgular bir sonraki bölümde verilmiştir.

- Referans ve yalnızca FDM entegre edilmiş binaların yaz ayında iç ortam sıcaklık dalgalanmalarında azalma kabiliyeti:

Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde yer alan FDM entegre edilmiş eğitim binalarında FDM konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığının iç ortamdaki sıcaklık dalgalanmalarını azaltma (SDA) kabiliyeti üzerindeki etkileri yaz dönemi için araştırılmış ve Şekil

5.22.'de verilmiştir.



Şekil 5.22. FDM konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığının yaz döneminde iç ortamın SDA değeri üzerindeki etkileri: (a) FDM-21 ºC; (b) FDM-27 ºC

Şekil 5.22.(a)'ya göre, duvarın en dış katmanına entegre edilen 10, 20 ve 30 mm kalınlığındaki FDM-21 (FDM(d)-10, FDM(d)-20 ve FDM(d)-30), sırasıyla Antalya'da 0,45, 0,42 ve 0,25 ºC SDA sağlamıştır. Aynı kalınlıktaki FDM-21 duvarın en iç katmanına entegre edildiğinde (FDM(i)), sırasıyla 0,62, 0,75 ve 0,85 ºC SDA elde edilmiştir. Ilıman ve nemli iklime sahip olan İstanbul'da, en dış katmana entegre edilen 10, 20 ve 30 mm FDM-21 sırasıyla yalnızca 0,19, 0,15 ve 0,10 ºC SDA sağlamıştır.

Ancak en iç katmanda konumlandırılan FDM-21, iç mekân sıcaklığını daha etkili bir şekilde azaltmış ve sırasıyla 0,51, 0,69 ve 0,77 ºC SDA sağlamıştır. Benzer şekilde, en dış katmana entegre edilen FDM-21, Ankara'da 0,43, 0,39 ve 0,30 ºC, Van'da 0,61, 0,55 ve 0,48 ºC ve Erzurum'da 1,18, 1,15 ve 1,09 ºC SDA sağlamıştır. Duvarın en iç katmanına entegre edilen FDM-21 ise Ankara'da 0,64, 0,94 ve 1,15 ºC, Van'da 1,15, 1,40 ve 1,61 ºC ve Erzurum'da 1,37, 1,66 ve 1,86 ºC SDA sağlamıştır.

Yalnızca FDM entegre edilmiş duvar kesitlerinde SDA açısından yaz dönemi için FDM konumu iç katmandadır. Dolayısıyla yoğun yaz koşullarının yaşandığı bölgelerde FDM'yi iç katmana yerleştirmek mümkündür. Her iki mevsim koşulları altında FDM-21 yerine FDM-27 kullanılması durumunda, FDM konumunun öğle saatlerindeki SDA üzerindeki etkinliği benzer bir değişim trendi göstermiştir.

5.22.(b)'e göre yaz döneminde duvarın en dış katmanına entegre edilen 10, 20 ve 30 mm FDM-27, Antalya'da sırasıyla 0,52, 0,46 ve 0,39 ºC SDA sağlamıştır. Aynı kalınlıktaki FDM-27 en iç katmana entegre edildiğinde ise sırasıyla 1,22, 1,35 ve 1,45 ºC SDA elde edilmiştir. Yaz döneminde, İstanbul'da en dış katmanda kullanılan FDM-27, sırasıyla 0,49, 0,40 ve 0,24 ºC SDA sağlarken, en iç katmanda sırasıyla 1,01, 1,19 ve 1,27 ºC SDA elde edilmiştir. En dış katmana entegre edilen FDM-27, Ankara'da 0,68, 0,60 ve 0,55 ºC, Van'da 1,23, 1,18 ve 1,10 ºC ve Erzurum'da 1,29, 1,20 ve 1,15 ºC SDA sağlamıştır. FDM-27, en iç katmana entegre edildiğinde ise Ankara'da 1,44, 1,74 ve 1,95 ºC, Van'da 1,81, 2,08 ve 2,27 ºC ve Erzurum'da 2,07, 2,36 ve 2,56 ºC SDA sağlamıştır.

Yaz döneminde FDM kalınlığının 10 mm'den 20 mm ve 30 mm'ye artırılması, en dış katmanda SDA etkinliğini azaltmıştır. Bunun nedeni, zaten öğle saatlerinde tamamen erimiş olan kalın FDM'nin yeniden katılaşmasının daha zor olmasıdır. Buna karşılık, en iç katmana entegre edilen FDM'nin kalınlığı 10 mm'den 20 ve 30 mm'ye çıkarıldığında, erime sıcaklığından bağımsız olarak, tüm iklim bölgelerinde SDA değerinin kademeli olarak arttığı gözlemlenmiştir.

Bu bulgulardan en yüksek sıcaklıkların tespit edildiği öğle saatlerinde yapı kabuğunun iç bölgesine entegre edilen FDM'nin etkili bir SDA sağlamada daha başarılı olduğu anlaşılmaktadır. Bunun nedeni, yapı kabuğundaki malzemelerin güneş radyasyonu

sayesinde ısınması ve ısı enerjisini bünyesinde depolarken erimesidir. Kış ve yaz döneminde öğle saatlerinde güneş radyasyonunun daha yüksek olması nedeniyle yapı kabuğunun dış yüzey sıcaklığı iç yüzey sıcaklığından daha yüksektir. Bu durum, FDM'nin bir enerji deposu olarak yeterince işlev görememesine neden olmaktadır (Qu ve diğ., 2021). Buna karşın, en iç katmana entegre edilen FDM, tüm iklim bölgelerinde ve hem 21 ºC hem de 27 ºC erime sıcaklıklarında, gündüz saatlerinde maksimum sıcaklıklara ulaşıldığında daha fazla SDA sağlayabilmiştir. Başka bir deyişle, gündüz saatlerinde güneş ışınımının artmasıyla yapı kabuğundaki düşey elemanların yüzey sıcaklığı yükseldiğinde, FDM bu ısı enerjisini emerek depolamış ve böylece iç ortam sıcaklığının daha fazla artmasını önlemiştir (Salihi ve diğ., 2022). Gece saatlerinde dış hava sıcaklığı düştüğünde ise FDM, depoladığı enerjiyi geri vererek katılaşmış ve bu süreçte gece boyunca soğuk ortam havasını depolamıştır. Depolanan soğuk enerji, gün içinde binaya salınarak mekanik bir sistem gereksinimi olmadan belirli bir süre için serbest soğutma sağlamıştır. Bu durumda iç bölgeye entegre edilen FDM daha yüksek oranda ısı enerjisi depolayabilmektedir.

Dış bölgeye entegre edilen FDM ısıl konfora olumlu yönde katkı sağlamaktadır ancak maruz kaldığı güneş ışınım şiddetinin daha yüksek olması nedeniyle iç ortamdaki sıcaklık dalgalanmalarını azaltmada daha kısıtlı bir etkinlik gösterebilmektedir. Bu bulgular, FDM'nin konumlandırılmasının ve kalınlığının, ısıl enerji depolama performansı üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymaktadır. (Jin ve diğ., 2014; Rai, 2021; Kalbasi ve Afrand, 2022; Arumugam ve Ramalingam, 2024; Zhang ve diğ., 2024; Lagou ve diğ., 2019) yaz dönemi için, ideal FDM konumunun, en iç katman olduğunu ve bunun en uygun konfor koşullarını sağladığını belirlemiştir. Bu araştırmada elde edilen bulgular literatür verileriyle uyumlu olması açısından önem arz etmektedir.

Yaz dönemi için Şekil 5.22.(a) ve 5.22.(b) karşılaştırıldığında tüm iklim bölgelerinde hem iç hem de dış katmana entegre edilen FDM-27'nin, FDM-21'e kıyasla daha yüksek SDA sağladığı belirlenmiştir. Örneğin, en iç katmana entegre edilen 30 mm FDM-21, Antalya, İstanbul, Ankara, Van ve Erzurum'da sırasıyla 0,85, 0,77, 1,15, 1,61 ve 1,86 ºC SDA sağlarken, 30 mm FDM-27 sırasıyla 1,45, 1,27, 1,95, 2,27 ve 2,56 ºC SDA elde etmiştir.

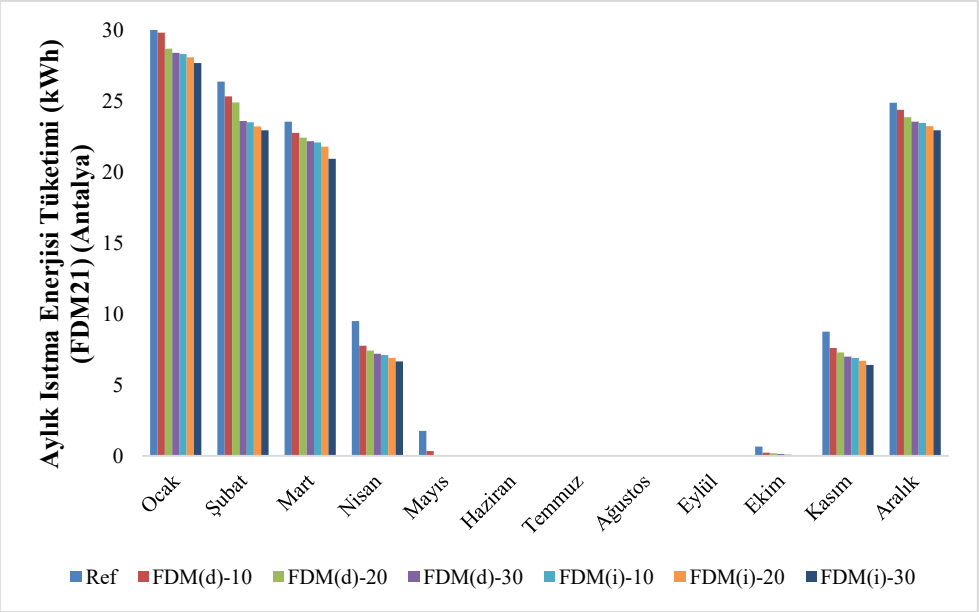
Yaz döneminde gece hava sıcaklıkları nispeten yüksek olduğu için, FDM'nin katılaşma sıcaklığının da yüksek olması gerekmektedir. Tüm iklim bölgelerinde gece sıcaklıkları 27 ºC'nin altına düştüğünden, FDM-27 faz dönüşümünü tamamlamıştır. Öte yandan, gece sıcaklığının 21 ºC'nin altına düşmediği Antalya ve İstanbul gibi şehirlerde, FDM-21 faz dönüşümünü tamamlayamamış ve sıvı halde kalmıştır. Ancak, Antalya ve İstanbul'da FDM-21 entegrasyonu sonucu düşük tespit edilen SDA, sıvı fazdaki FDM'nin (0,15 W/mK) katı fazdaki FDM'ye (0,20 W/mK) göre daha düşük ısıl iletkenlik katsayısına sahip olmasından kaynaklanmıştır ve bu durum daha yüksek bir ısıl direnç oluşturmuştur (Lei ve Yang, 2016).

Gece sıcaklıklarının Ankara'da 19,8 ºC, Van'da 14,3 ºC ve Erzurum'da 13,1 ºC'ye düşmesi nedeniyle, FDM-21 ve FDM-27 faz dönüşümünü tamamlamıştır. Bu bulguya benzer şekilde, (Lei ve Yang, 2016) 23 ºC'nin altındaki erime sıcaklıklarının tropikal Singapur ikliminde FDM'nin faz dönüşümünü tamamlamada etkili olmadığını belirlemiştir. Başka bir çalışmada, yaz döneminde 24-28 ºC arasındaki erime sıcaklıklarının etkili SDA sağlamak için daha uygun olduğu tespit edilmiştir (Cabeza ve diğ., 2017). Ancak, iklim özellikleri ve coğrafi konumun etkisi her zaman göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin, İspanya'nın Sevilla kentinde yaz ayları için optimum FDM erime sıcaklığı 26 ºC olarak belirlenirken (Cabeza ve diğ., 2017), Avustralya'nın Adelaide kentinde 25 ºC olarak tespit edilmiştir (Alam ve diğ., 2014). Türkiye'de soğutma dönemi için FDM'nin optimum erime sıcaklıkları Diyarbakır'da 24-26 ºC, Konya'da 24-25 ºC ve Erzurum'da 27-32 ºC olarak belirlenmiştir (Arıcı ve diğ., 2020). Bu bağlamda, bu araştırmada kış döneminde gün içerisinde daha yüksek SDA sağlayan ideal FDM erime sıcaklığı (21 ºC) ve yaz döneminde gün içerisinde daha yüksek SDA sağlayan ideal FDM erime sıcaklığı (27 ºC) literatür verileriyle uyum göstermektedir.

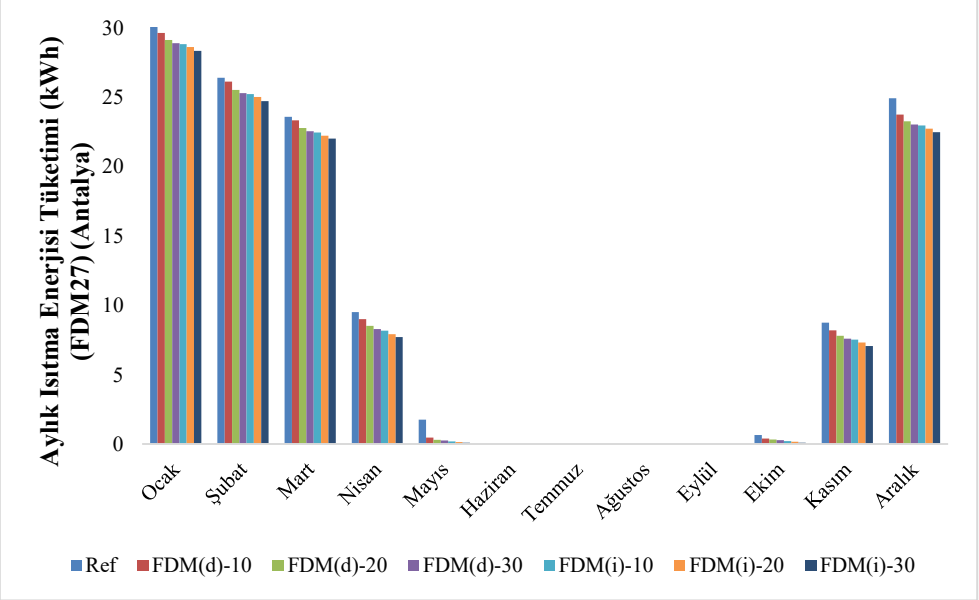
5.1.2. FDM Konumu, Kalınlığı ve Erime Sıcaklığının Enerji Tasarrufu Üzerindeki Etkisi

- Antalya'da referans ve FDM entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi:

Referans, FDM(i) ve FDM(d) entegre edilmiş binaların Antalya'da kış dönemi için yıllık toplam ısıtma enerjisi tüketimi Şekil 5.23. ve Şekil 5.24.'te verilmiştir.



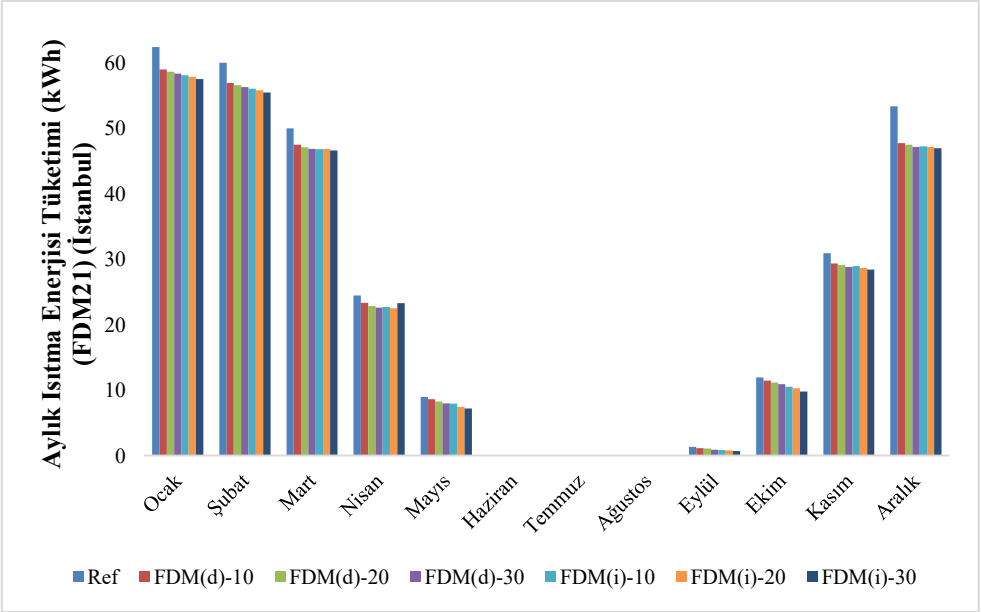
Şekil 5.23. Antalya'da referans ve FDM-21 entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi



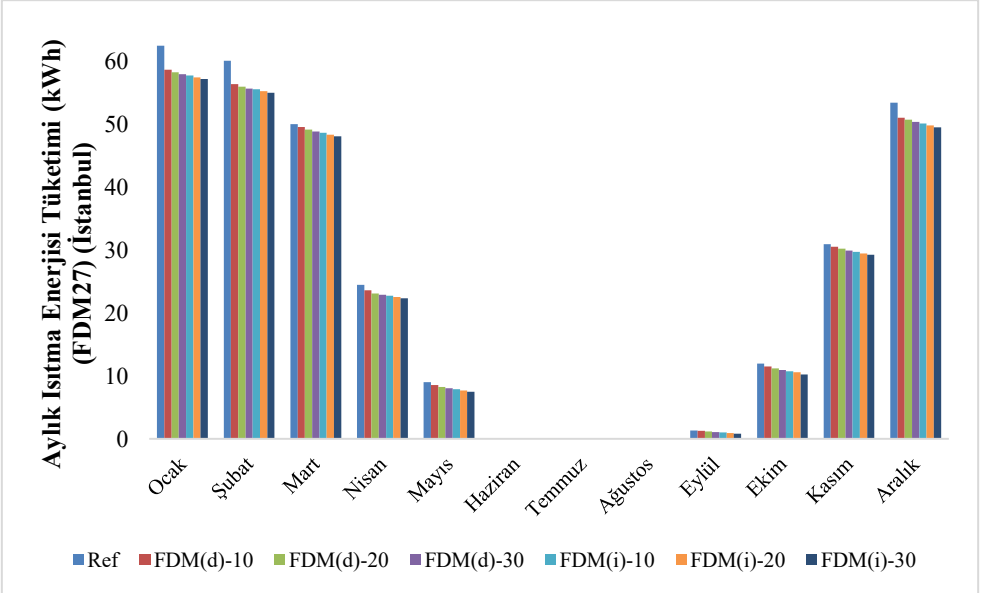
Şekil 5.24. Antalya'da referans ve FDM-27 entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi

- İstanbul'da referans ve FDM entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi:

Referans, FDM(i) ve FDM(d) entegre edilmiş binaların İstanbul'da kış dönemi için yıllık toplam ısıtma enerjisi tüketimi Şekil 5.25. ve Şekil 5.26.'da verilmiştir.



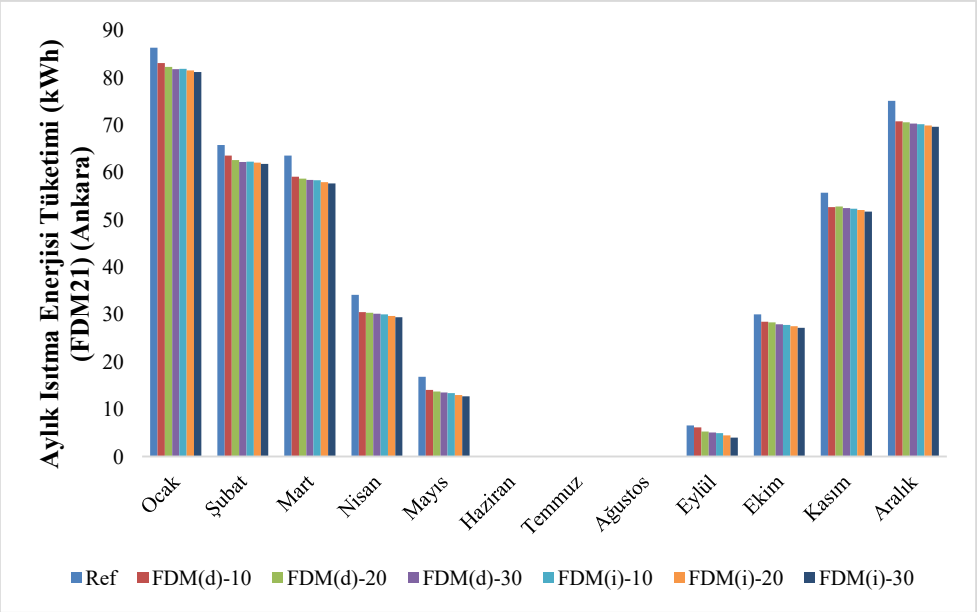
Şekil 5.25. İstanbul'da referans ve FDM-21 entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi



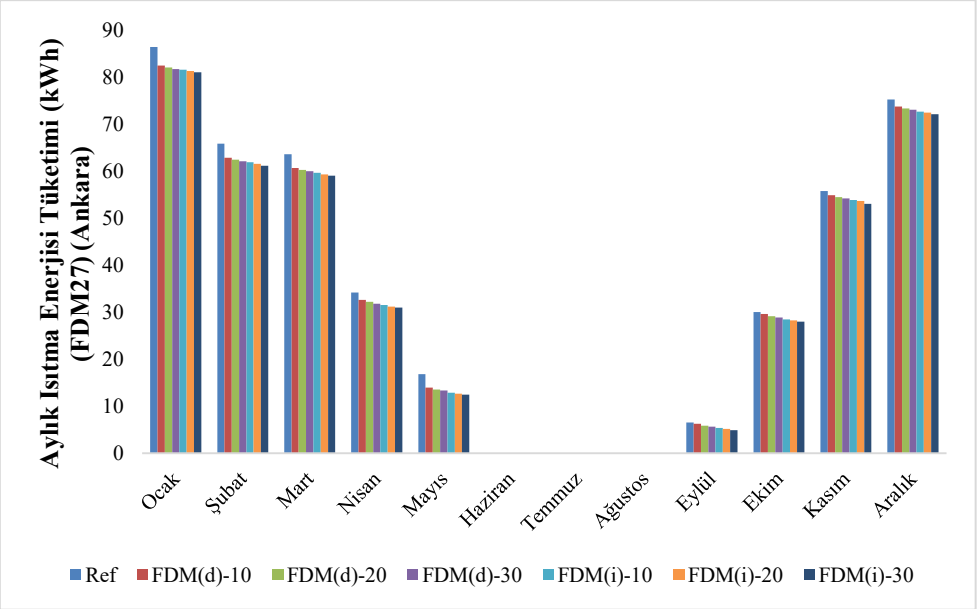
Şekil 5.26. İstanbul'da referans ve FDM-27 entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi

- Ankara'da referans ve FDM entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi:

Referans, FDM(i) ve FDM(d) entegre edilmiş binaların Ankara'da kış dönemi için yıllık toplam ısıtma enerjisi tüketimi Şekil 5.27. ve Şekil 5.28.'de verilmiştir.



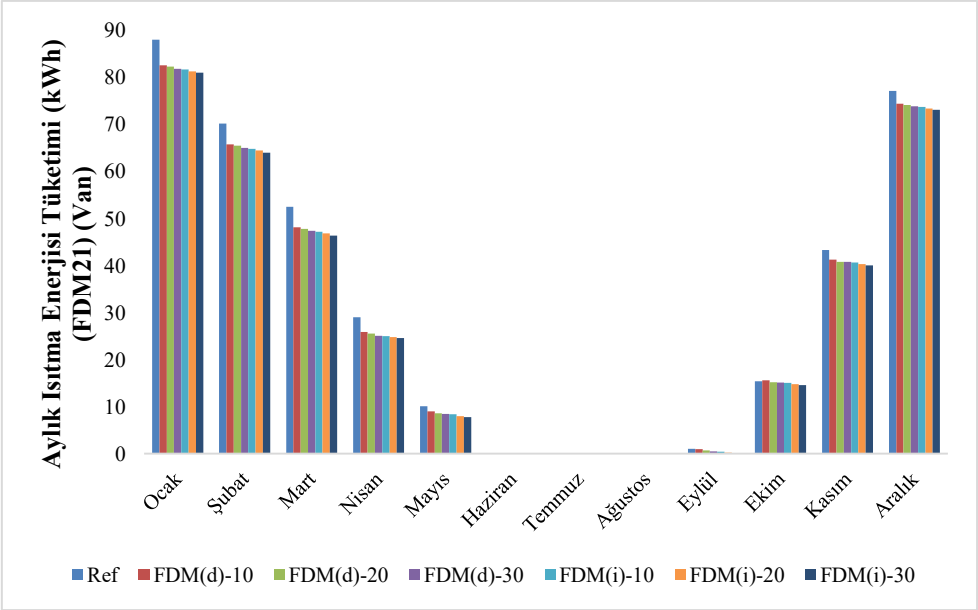
Şekil 5.27. Ankara'da referans ve FDM-21 entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi



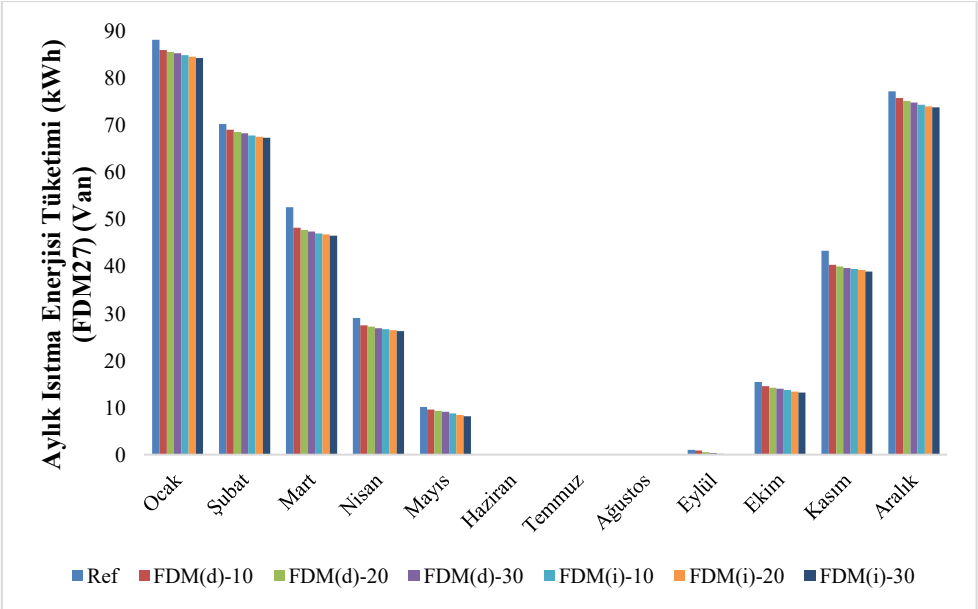
Şekil 5.28. Ankara'da referans ve FDM-27 entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi

- Van'da referans ve FDM entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi:

Referans, FDM(i) ve FDM(d) entegre edilmiş binaların Van'da kış dönemi için yıllık toplam ısıtma enerjisi tüketimi Şekil 5.29. ve Şekil 5.30.'da verilmiştir.



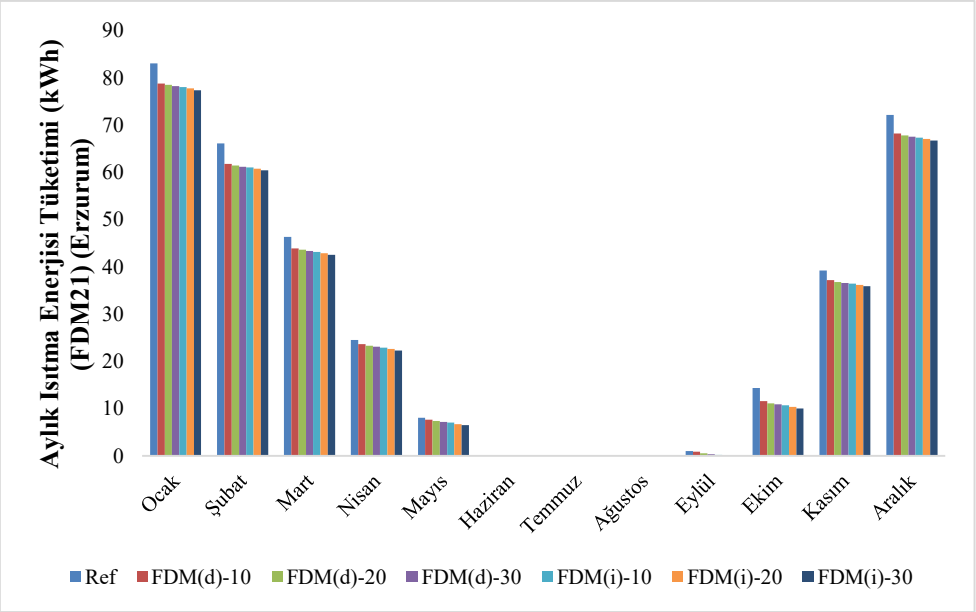
Şekil 5.29. Van'da referans ve FDM-21 entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi



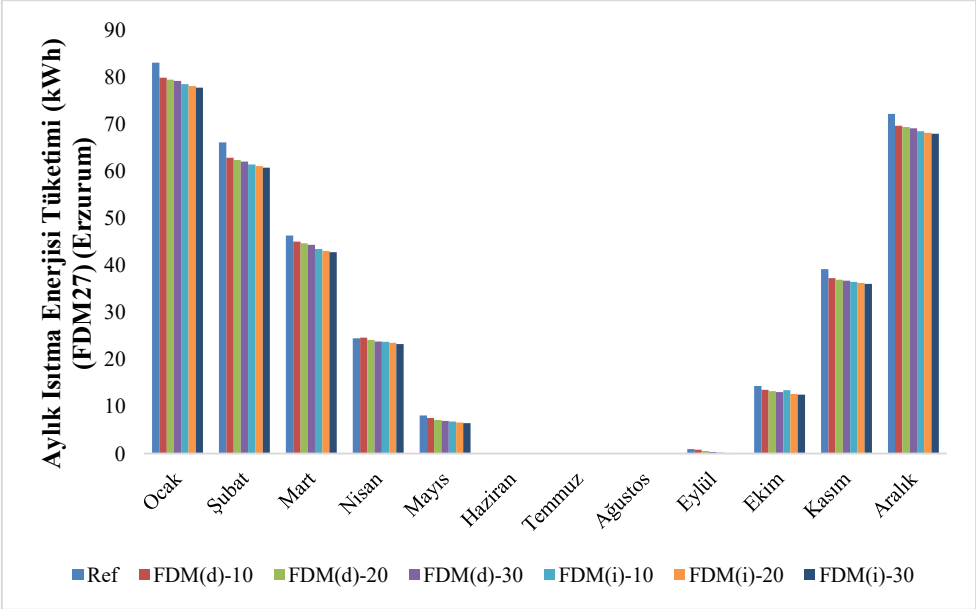
Şekil 5.30. Van'da referans ve FDM-27 entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi

- Erzurum'da referans ve FDM entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi:

Referans, FDM(i) ve FDM(d) entegre edilmiş binaların Erzurum'da kış dönemi için yıllık toplam ısıtma enerjisi tüketimi Şekil 5.31. ve Şekil 5.32.'de verilmiştir.



Şekil 5.31. Erzurum'da referans ve FDM-21 entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi



Şekil 5.32. Erzurum'da referans ve FDM-27 entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi

Sıcak-nemli iklim özelliklerine sahip Antalya'da kış döneminde ortalama hava sıcaklıkları diğer illere nazaran yüksek olduğundan yıllık ısıtma enerjisi tüketimi en düşüktür. Referans binanın yıllık toplam ısıtma enerjisi tüketimi 125,60 kWh'tir. FDM(d) ve FDM(i) entegrasyonu ile bu enerji tüketimi sırasıyla 113,35 ve 111,81 kWh'e kadar azalmıştır (Şekil 5.23.; Şekil 5.24.). Isıtma enerjisi gereksinimi bakımından Antalya'yı ılımlı-nemli iklim özelliklerine sahip İstanbul takip etmektedir.

İstanbul'da referans binanın yıllık toplam ısıtma enerjisi tüketimi 303,46 kWh'tir. FDM(d) ve FDM(i) entegrasyonu ile bu enerji tüketimi sırasıyla 282,16 ve 280,22 kWh'e kadar azalmıştır (Şekil 5.25.; Şekil 5.26.). Yıllık ısıtma enerjisi tüketimi üçüncü sırada olan il Erzurum'dur (354,35 kWh). Bu değer duvar kesitinde FDM(d) kullanımı ile 330,59 kWh ve FDM(i) kullanımı ile 327,33 kWh'e kadar azalmıştır (Şekil 5.31.; Şekil 5.32.). Dördüncü derece iklim bölgesinde yer alan Van'da yıllık toplam ısıtma enerjisi gereksinimi 386,58 kWh olup, FDM(d) kullanımı ile 360,42 kWh ve FDM(i) kullanımı ile 357,41 kWh'e kadar azalmıştır (Şekil 5.29.; Şekil 5.30.). Yıllık toplam ısıtma enerjisi gereksinimi en yüksek olan il Ankara'dır. Ankara'da referans binanın yıllık toplam ısıtma enerjisi tüketimi 433,98 kWh'tir. FDM(d) ve FDM(i) entegrasyonu ile bu enerji tüketimi sırasıyla 404,25 ve 401,30 kWh'e kadar azalmıştır (Şekil 5.27.; Şekil 5.28.).

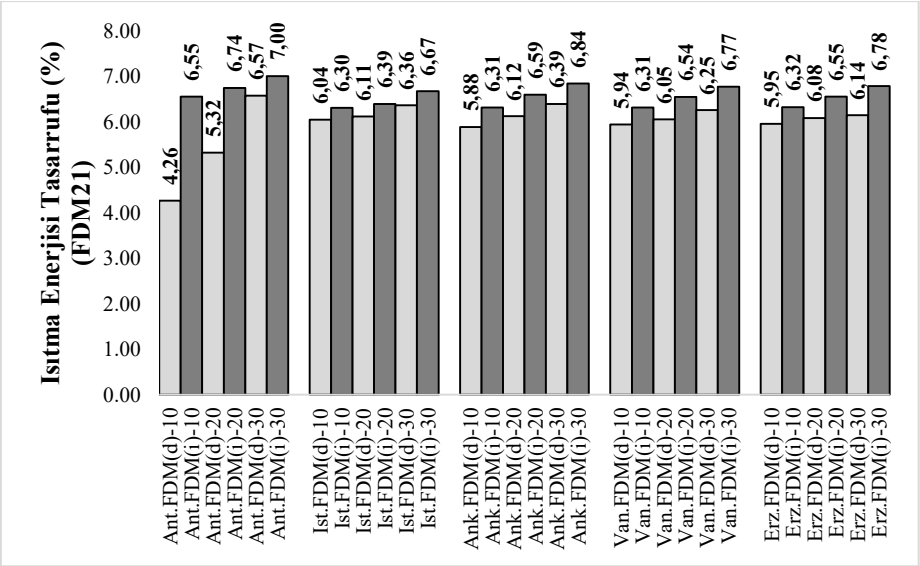
Yıllık toplam ısıtma enerjisi tüketiminin en düşük olduğu il yıl içerisinde en yüksek ortalama sıcaklığa sahip Antalya, en yüksek olduğu il ise Ankara'dır. İstanbul ılımlı-nemli bir iklimsel geçiş bölgesinde yer almasından dolayı ısıtma enerjisi tüketimi Antalya'ya nazaran daha yüksek, ancak diğer illere nazaran daha düşüktür. Van ve Erzurum'un kış aylarındaki ortalama hava sıcaklığı Ankara'ya nazaran daha düşük olmasına rağmen (Şekil 4.1.) bu illerin yaz aylarındaki toplam soğutma yükünün Ankara'dan daha düşük olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.2.). Şekil 4.2.'e göre ise, Ankara'daki ortalama hava sıcaklığı, Van ve Erzurum'dakinden daha yüksektir. Ancak, Van ve Erzurum'da belirlenen toplam soğutma yüklerinin, İstanbul ve Ankara'dakilerden daha yüksek olduğu görülmüştür. Bölgelerin soğutma yükleri bir sonraki bölümde irdelenmektedir.

Yukarıdaki veriler ışığında, yapıların ısıtma ve soğutma enerjisi tüketiminde tek etkili parametrenin bölgenin ortalama hava sıcaklığı olmadığı çıkarılabilmektedir. Genellikle, küresel güneş ışınımı şiddeti bölgenin rakımı arttıkça artmaktadır (Qu ve diğ., 2021). Temsili illere ait güneş ışınımı şiddeti (Tablo 4.6) Türkiye Meteoroloji Servisi tarafından hazırlanan Türkiye Güneşlenme Potansiyeli Atlası'ndan (Türkiye Güneşlenme Potansiyeli Atlası, 2010) elde edilmiştir. Tablo 4.6.'da Antalya'nın en düşük rakıma sahip olmasına rağmen (39 m) güneş ışınım şiddetinin en yüksek olması ise Türkiye'nin güneyinde yer almasından (ekvatora nispeten daha yakın) dolayı daha

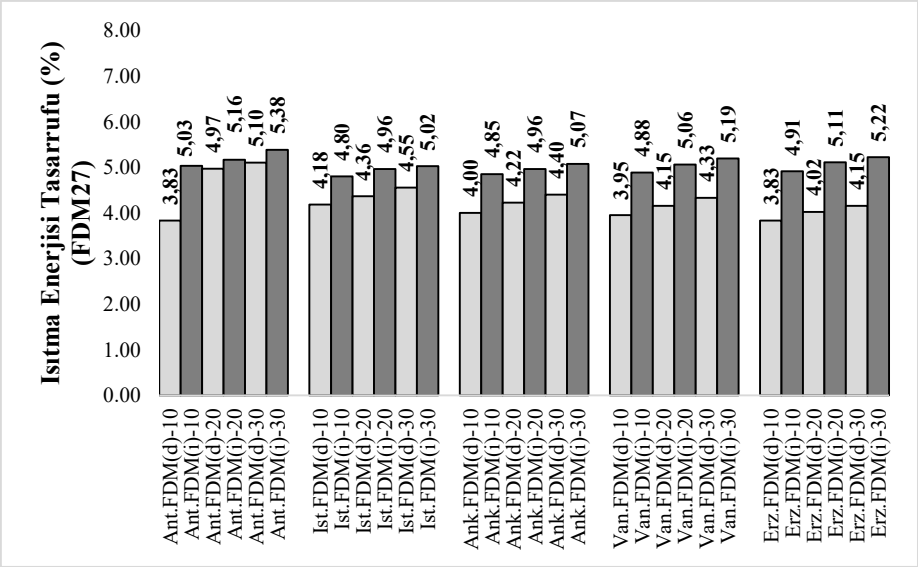
yüksek güneş ışınımına maruz kalmasından kaynaklanmaktadır. İstanbul, Ankara, Van ve Erzurum'da ise rakım arttıkça güneş ışınım şiddeti kademeli olarak artmaktadır. İstanbul, Ankara, Van ve Erzurum'un rakımları sırasıyla 40, 938, 1726 ve 1890 m'dir. Van ve Erzurum'da Ankara'ya nazaran yüksek rakım nedeniyle oluşan daha fazla güneş ışınım şiddeti öğle saatlerinde yapı kabuğunun daha fazla ısınmasını, dolayısıyla FDM'nin daha fazla enerji depolamasını ve ısıtma yükünün Ankara'ya nazaran daha az (Şekil 5.16.; Şekil 5.17.) olmasını sağlamıştır. Van ve Erzurum'un güneş ışınımı şiddeti sırasıyla 1493 KWh/m² ve 1511 KWh/m² iken, İstanbul ve Ankara'nın değerleri sırasıyla 1389 KWh/m² ve 1306 KWh/m²'dir. Bu nedenle, bina için toplam soğutma enerjisi gereksinimi daha düşük çıkabilmektedir. Buradan çıkarılacak sonuç, FDM teknolojisini kullanarak pasif binaları tasarlarken sadece iklim sınıflandırmasına bağlı kalmak değil, aynı zamanda deniz seviyesinden yükseklik ve güneş ışınım şiddeti gibi diğer coğrafi faktörlerin de dikkate alınması gerektiğidir.

- Referans ve FDM entegre edilmiş binaların ısıtma enerjisi tasarrufu oranı üzerindeki etkileri:

Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde yer alan FDM entegre edilmiş eğitim binalarında FDM konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığının ısıtma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri Şekil 5.33. ve Şekil 5.34'te verilmiştir.



Şekil 5.33. Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde yer alan FDM-21 entegre edilmiş eğitim binalarında FDM konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığının ısıtma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri



Şekil 5.34. Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde yer alan FDM-27 entegre edilmiş eğitim binalarında FDM konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığının ısıtma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri

FDM'nin erime sıcaklığına bakılmaksızın, bütün iklim bölgelerinde FDM(i) FDM(d)'ye nazaran daha yüksek oranda ısıtma enerjisi tasarrufu sergilemiştir. FDM'nin konumu iç katmanlardan dış katmanlara doğru ilerlediğinde yapı kabuğundan ısı kayıpları artmakta ve iç ortam sıcaklığı azalmaktadır. Bu sıcaklık azalışını dengelemek için HVAC sistemlerine olan ihtiyaç artmış, bu da enerji tüketiminin artmasına neden olmuştur.

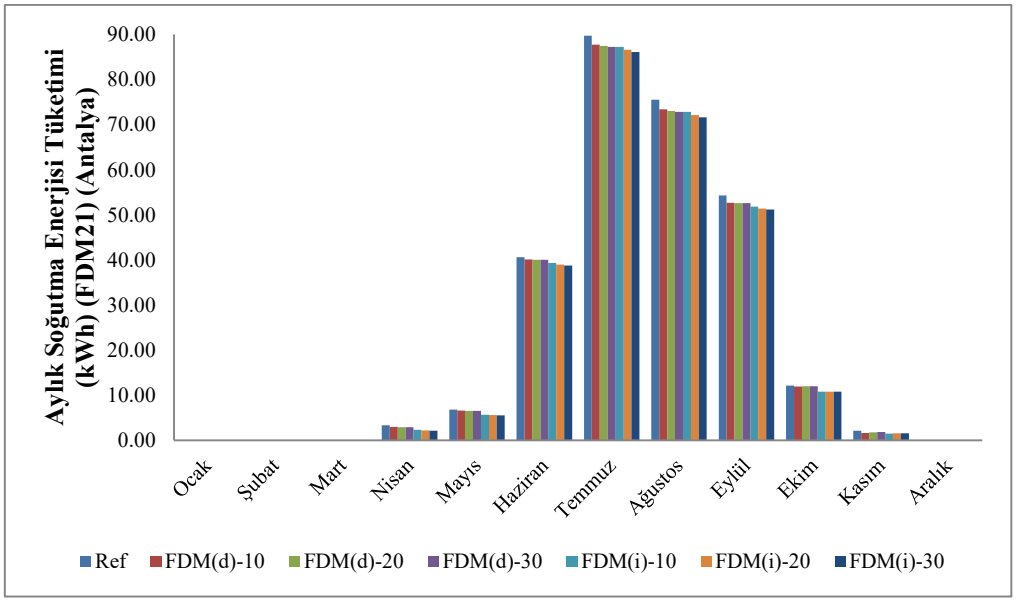
FDM kalınlığı, yıllık toplam ısıtma enerjisi tasarrufunu etkileyen bir diğer parametredir. En yüksek ısıtma enerjisi tasarrufu iç bölgeye entegre edilen 30 mm FDM-21 ile elde edilmiş olup değerler şöyledir: Antalya'da %7, İstanbul'da %6,67, Ankara'da %6,84, Van'da %6,77 ve Erzurum'da %6,78'dir. En düşük ısıtma enerjisi tasarruf oranları ise 10 mm kalınlığa sahip FDM'nin duvar kesitinin dış bölgesine entegre edilmesiyle elde edilmiştir. Burada elde edilen veriler diğer literatür çalışmalarıyla kıyaslanmıştır. Örneğin, Pekin (Çin)'in karasal muson iklimi için 30 mm FDM ile %17 (Chen ve diğ., 2008), Vuhan (Çin)'in sıcak-nemli iklim koşullarında 30 mm FDM ile %14,9 (Zhu ve diğ., 2015), Tunus'un farklı bölgeleri için (Susa, Bizerte, Tabarka, Tuzer) 40 mm FDM ile %26,77-41,61 (Dardouri ve diğ., 2023), Johannesburg (Güney Afrika)'nın ılıman iklim koşullarında 12,5 mm FDM ile %21 (Saffari ve diğ., 2017), Orta Doğu Bölgesinde hem sıcak ve hem de soğuk iklim bölgelerinde 20 mm FDM ile %20-32 (Afrand ve Dehkordi, 2022) ideal kalınlıklar olup kış döneminde en yüksek enerji tasarrufu vermektedir. Bu bakımdan, bu araştırmada benzer FDM kalınlığı

kullanılmasına rağmen, elde edilen ısıtma enerjisi tasarruf oranlarının diğer bölgelere nazaran nispeten daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Ancak burada FDM kalınlığının dışında, bölgelerin iklimsel ve fiziksel koşulları, yapının yönü, yapının mimari tasarımı (formu), fonksiyonu, yapı kabuğu türü, katmanları ve yapı kabuğunda kullanılan diğer malzemelerin termofiziksel özelliklerindeki farklılıklar göz önünde bulundurulmalıdır.

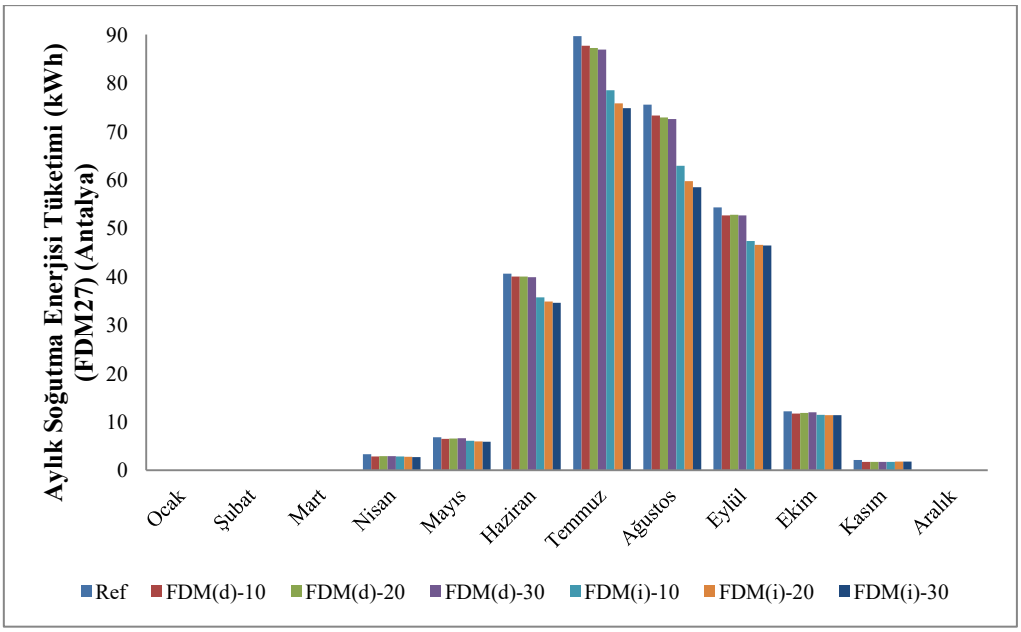
Bütün iklim bölgelerinde FDM-21, FDM-27'ye nazaran daha yüksek oranda ısıtma enerjisi tasarrufu sağlamıştır. Bu bulgunun nedeni, FDM-21'in kışın güneşli saatlerde daha kolay eriyebilecek kadar düşük erime sıcaklığına sahip olması ve böylece daha yüksek miktarda enerji depolayabilmesi olarak açıklanabilir. Geceleri ortam sıcaklığı azaldığında FDM-21 depolamış olduğu enerjiyi ortama geri vererek HVAC sistemine olan ihtiyacın azalmasına FDM-27'ye nazaran daha fazla katkı sağlamaktadır. Düşük erime sıcaklığına sahip olan FDM-21'in, kış döneminde gün içerisindeki sınırlı güneş kazanımlarını daha etkin şekilde kullanarak ısıl konforun sürdürülebilirliğine katkı sağladığı anlaşılmaktadır. Bu bağlamda, iklimsel koşullara uygun erime sıcaklığına sahip FDM seçimi enerji tasarrufu açısından önemli bir parametre olarak değerlendirilmektedir. Bu bulgu, pasif ısıtma stratejilerinin etkinliğini artırmak amacıyla, FDM'nin erime sıcaklığına bağlı olarak yapılan malzeme seçiminin ve yerleşim stratejisinin, tasarım sürecinde dikkatle ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Literatürde yer alan araştırma sonuçlarına göre, Johannesburg (Güney Afrika)'da FDM-20 ile %21 (Saffari ve diğ., 2017), Yeni Güney Galler (Avustralya)'da FDM-21 ile %12 (Mohseni ve Tang, 2021), Tunus'un farklı bölgelerinde (Susa, Bizerte, Tabarka, Tuzer) FDM-21 ile %26,77-41,61 (Dardouri ve diğ., 2023), Orta Doğu Bölgesinde FDM-22 ile %20-32 (Afrand ve Dehkordi, 2022), Kansas City (ABD)'de FDM-25 ile %33 (Asghari ve diğ., 2024) ve Xi'an (Çin)'de FDM-25 ile %29,39'e (Zhang ve diğ., 2024) varan enerji tasarrufları elde edilmiştir. Türkiye'de ise İstanbul'da FDM-21 ile %14,76 (Terhan ve İlgar 2023), İzmir'de FDM-23 ile %1,68-5,37 (İlgar ve Terhan, 2024) enerji tasarrufu elde edilmiştir.

- Antalya'da referans ve FDM entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi:

Referans, FDM(i) ve FDM(d) entegre edilmiş binaların Antalya'da yaz dönemi için yıllık toplam soğutma enerjisi tüketimi Şekil 5.35. ve Şekil 5.36.'da verilmiştir.



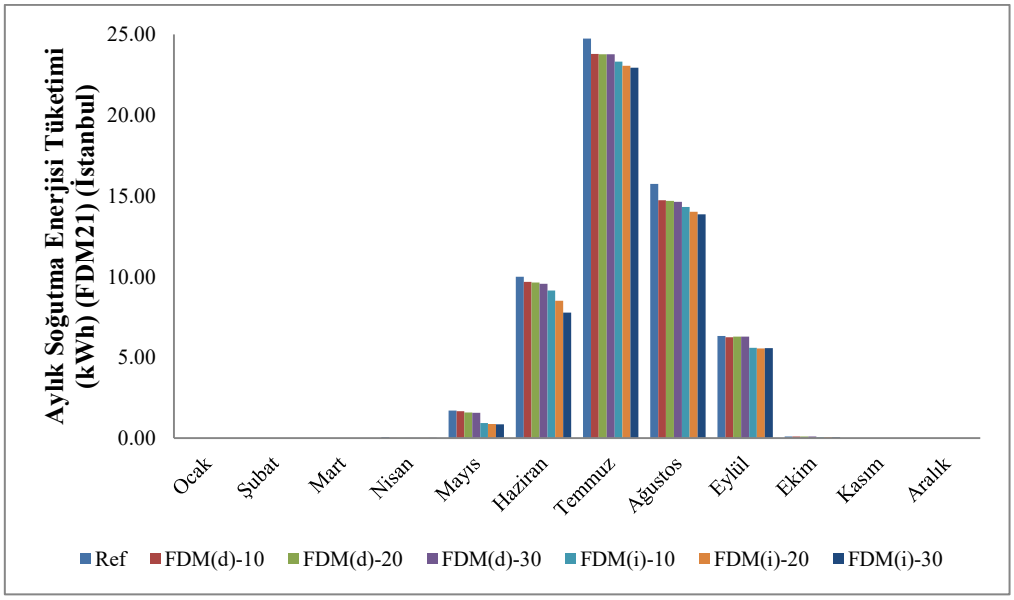
Şekil 5.35. Antalya'da referans ve FDM-21 entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi



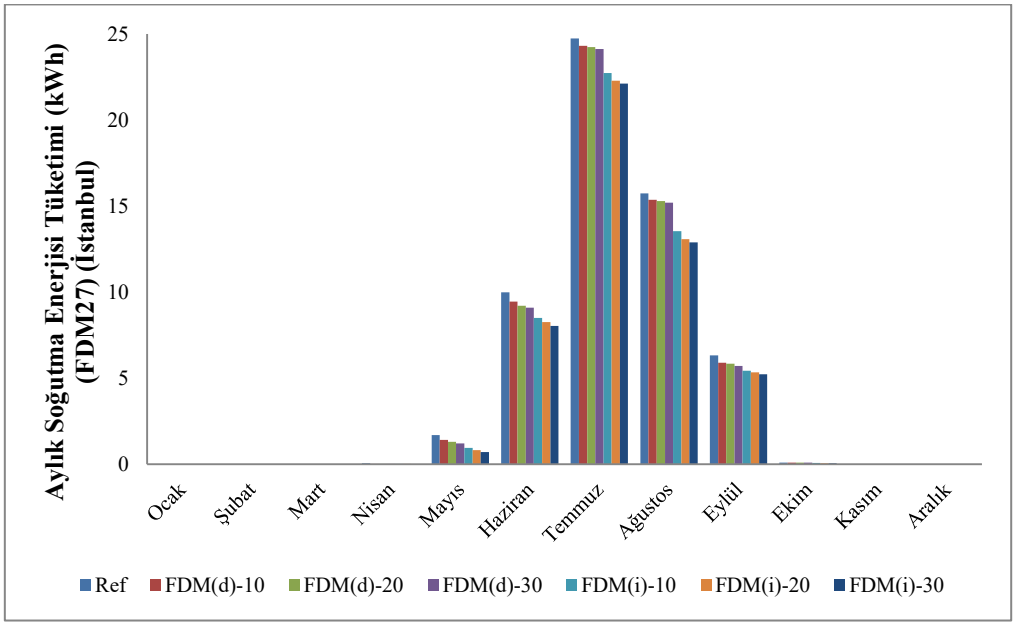
Şekil 5.36. Antalya'da referans ve FDM-27 entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi

- İstanbul'da referans ve FDM entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi:

Referans, FDM(i) ve FDM(d) entegre edilmiş binaların İstanbul'da yaz dönemi için yıllık toplam soğutma enerjisi tüketimi Şekil 5.37. ve Şekil 5.38.'de verilmiştir.



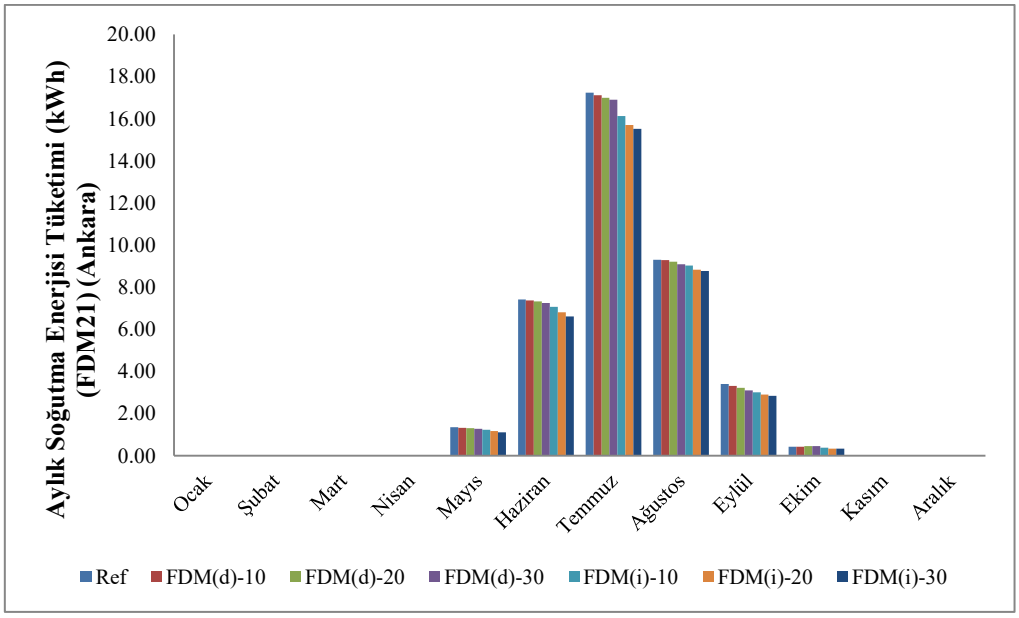
Şekil 5.37. İstanbul'da referans ve FDM-21 entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi



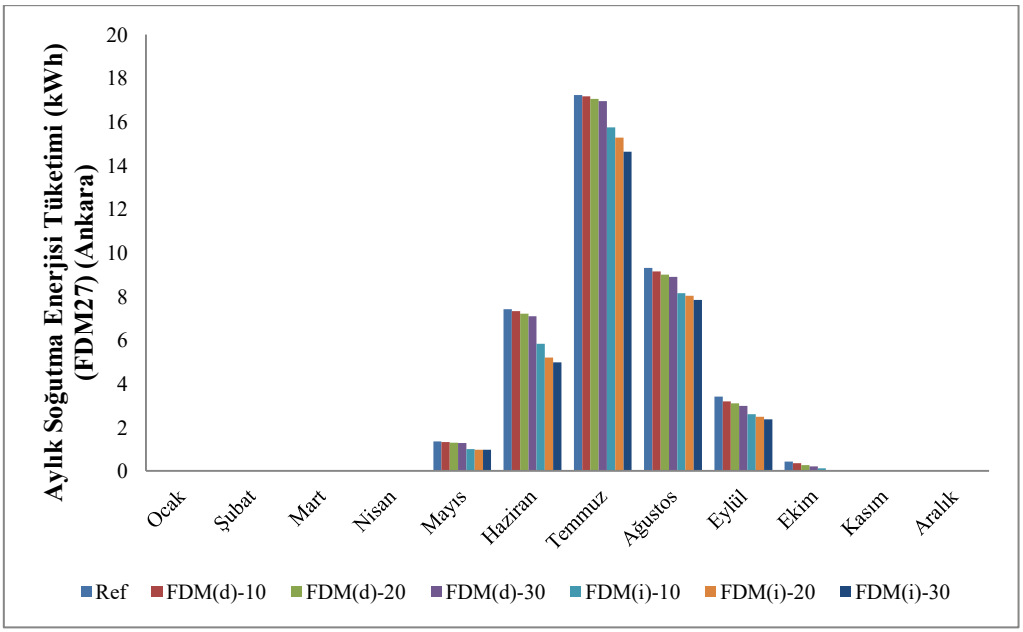
Şekil 5.38. İstanbul'da referans ve FDM-27 entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi

- Ankara'da referans ve FDM entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi:

Referans, FDM(i) ve FDM(d) entegre edilmiş binaların Ankara'da yaz dönemi için yıllık toplam soğutma enerjisi tüketimi Şekil 5.39. ve Şekil 5.40.'da verilmiştir.



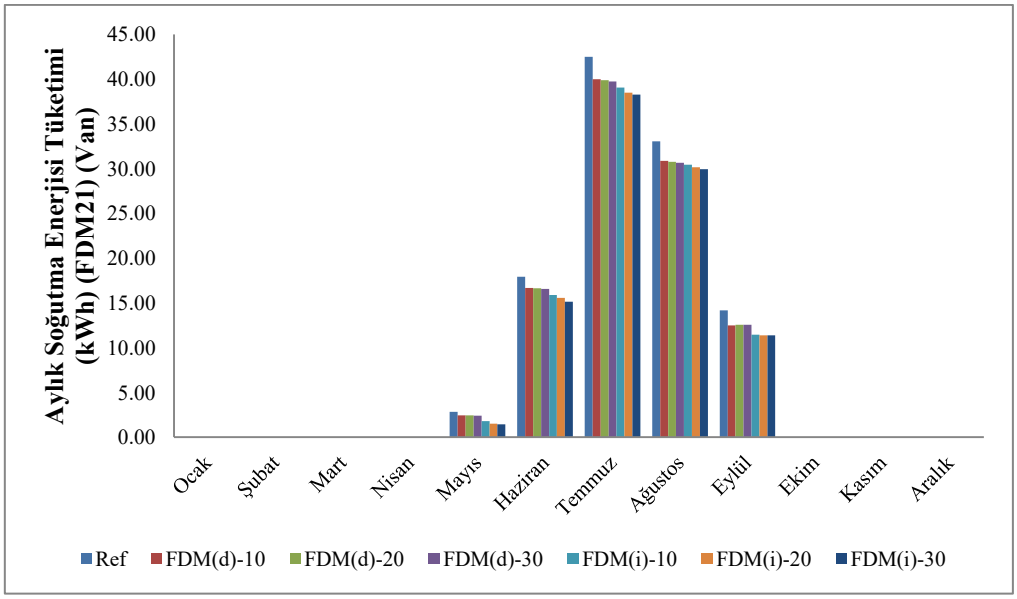
Şekil 5.39. Ankara'da referans ve FDM-21 entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi



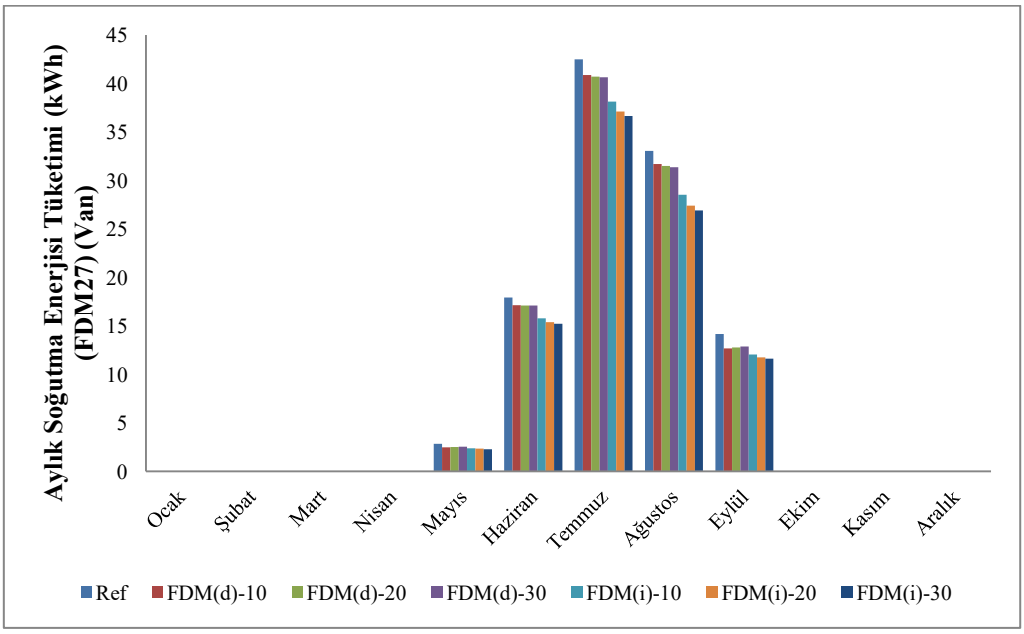
Şekil 5.40. Ankara'da referans ve FDM-27 entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi

- Van'da referans ve FDM entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi:

Referans, FDM(i) ve FDM(d) entegre edilmiş binaların Van'da yaz dönemi için yıllık toplam soğutma enerjisi tüketimi Şekil 5.41. ve Şekil 5.42.'de verilmiştir.



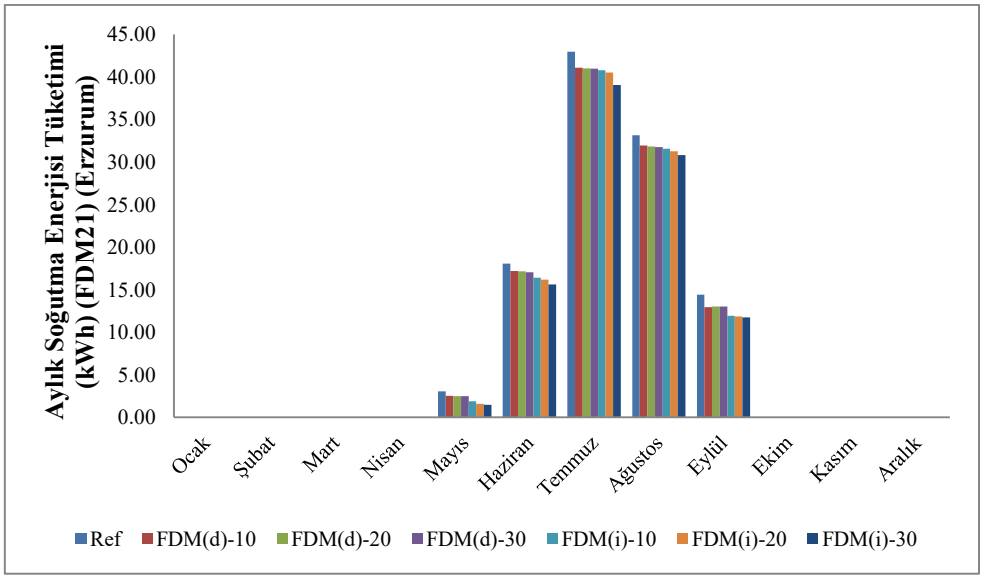
Şekil 5.41. Van'da referans ve FDM-21 entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi



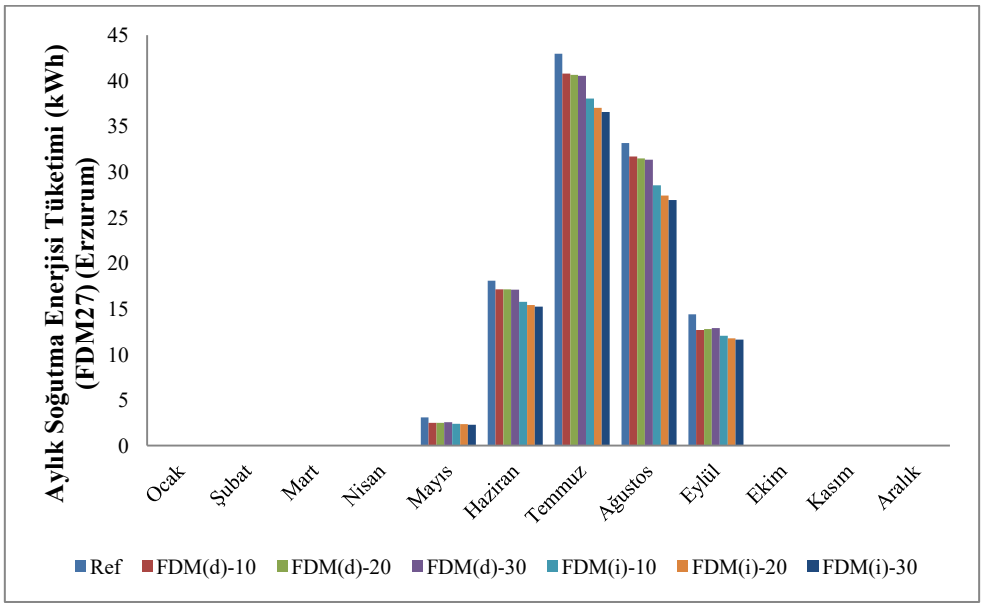
Şekil 5.42. Van'da referans ve FDM-27 entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi

- Erzurum'da referans ve FDM entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi:

Referans, FDM(i) ve FDM(d) entegre edilmiş binaların Erzurum'da yaz dönemi için yıllık toplam soğutma enerjisi tüketimi Şekil 5.43. ve Şekil 5.44.'te verilmiştir.



Şekil 5.43. Erzurum'da referans ve FDM-21 entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi



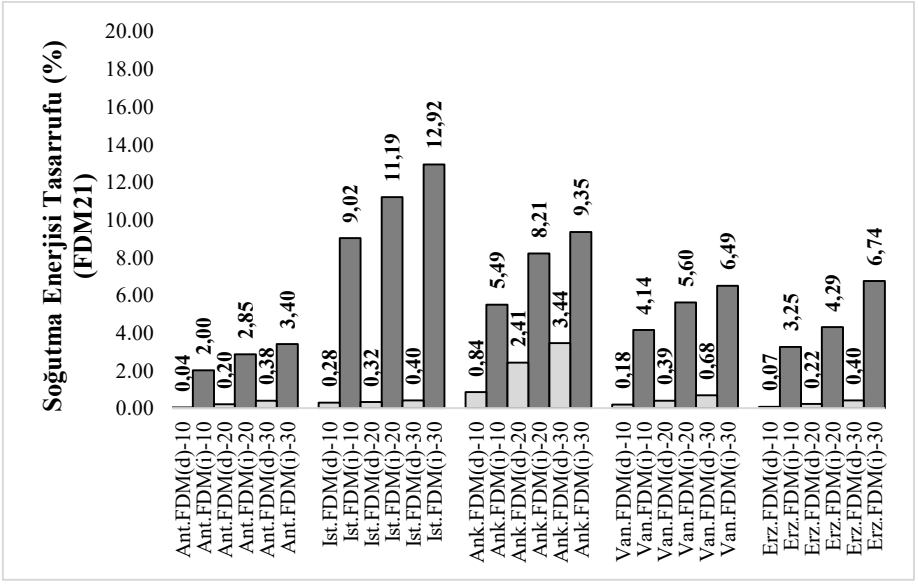
Şekil 5.44. Erzurum'da referans ve FDM-27 entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi

Antalya, en yüksek soğutma enerjisi tüketimine sahiptir. Referans binanın yıllık toplam soğutma enerjisi tüketimi 284,43 kWh olarak hesaplanmıştır. FDM(d) ve FDM(i) entegrasyonu, bu soğutma enerjisini sırasıyla 275,11 kWh ve 235,88 kWh'ye kadar düşürmüştür. Antalya'da soğutma dönemi nisan ayının ortasından kasım ayının başına kadar devam etmiştir (Şekil 5.35.; Şekil 5.36.). İstanbul'da referans binanın toplam soğutma yükü 58,62 kWh iken, FDM(d) ve FDM(i) entegrasyonu bu yükü sırasıyla 55,81 kWh ve 48,99 kWh'ye düşürmüştür. İstanbul'da soğutma dönemi mayıs ayının

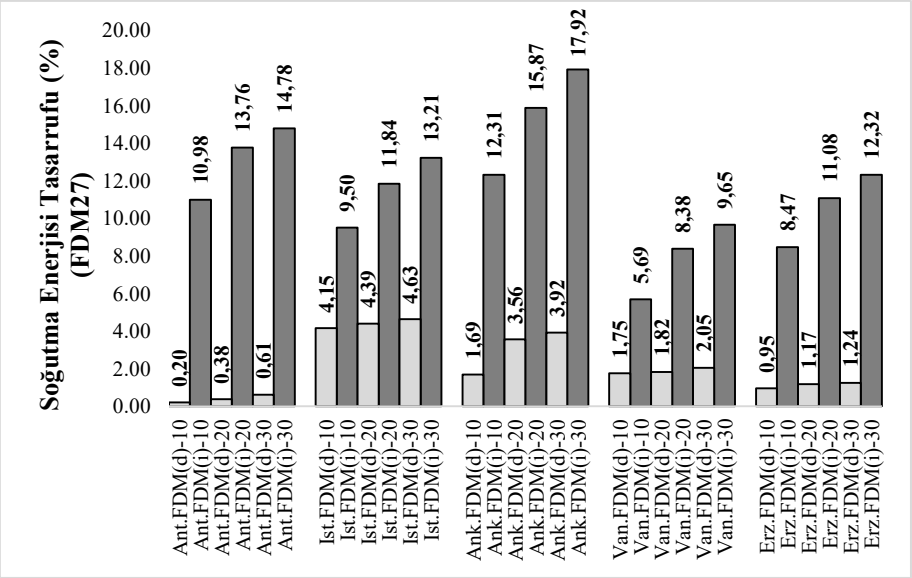
sonundan eylül ayına kadar sürmüştür. En yüksek soğutma yükü temmuz ayında gözlemlenirken, bunu sırasıyla ağustos, haziran ve eylül ayları takip etmiştir (Şekil 5.37.; Şekil 5.38.). Ankara'da, soğutma dönemi mayıs ayının ortasında başlamış ve eylül ayının sonunda sona ermiştir. Referans, FDM(d) ve FDM(i) entegreli binaların yıllık soğutma enerji tüketimleri sırasıyla 39,10 kWh, 37,50 kWh ve 30,77 kWh olarak hesaplanmıştır (Şekil 5.39.; Şekil 5.40.). Van'da, referans, FDM(d) ve FDM(i) entegreli binaların yıllık soğutma enerji tüketimleri sırasıyla 110,45 kWh, 107,11 kWh ve 92,63 kWh olarak belirlenmiştir (Şekil 5.41.; Şekil 5.42.). Erzurum'da ise referans bina için 111,63 kWh, FDM(d) entegreli bina için 110,20 kWh ve FDM(i) entegreli bina için 92,56 kWh soğutma yükü hesaplanmıştır (Şekil 5.43.; Şekil 5.44.). Van ve Erzurum'da soğutma dönemi mayıs ayının sonunda başlamış ve eylül ayında sona ermiştir. En yüksek soğutma ihtiyacı temmuz ayında görülmüştür.

- Referans ve FDM entegre edilmiş binaların soğutma enerjisi tasarrufu oranı üzerindeki etkileri:

Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde yer alan FDM entegre edilmiş eğitim binalarında FDM konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığının soğutma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri Şekil 5.45. ve Şekil 5.46'da verilmiştir.



Şekil 5.45. Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde yer alan FDM-21 entegre edilmiş eğitim binalarında FDM konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığının soğutma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri



Şekil 5.46. Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde yer alan FDM-27 entegre edilmiş eğitim binalarında FDM konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığının soğutma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri

FDM'nin erime sıcaklığına bakılmaksızın, bütün iklim bölgelerinde FDM(i) FDM(d)'ye nazaran daha yüksek oranda soğutma enerjisi tasarrufu sergilemiştir. FDM'nin konumu iç katmanlardan dış katmanlara doğru ilerlediğinde yapı kabuğu daha fazla ısınmakta ve bu sıcaklık artışını dengelemek için HVAC sistemlerine olan ihtiyaç artarak toplam enerji tüketimini arttırmaktadır.

FDM kalınlığı, yıllık toplam ısıtma ve soğutma enerjisi tasarrufunu etkileyen bir diğer parametredir. FDM kalınlığının 10 mm'den 20 mm ve 30 mm'ye arttırılması, tüm iklim bölgelerinde, ısıtma enerjisinde olduğu gibi, soğutma enerjisi tasarruf oranlarını da artırmıştır. En yüksek soğutma enerjisi tasarrufu oranları, özellikle en iç katmanda kullanılan 30 mm FDM-27 ile elde edilmiştir ve oranlar şu şekildedir: Antalya %14,78; İstanbul %13,21; Ankara %17,92; Van %9,65 ve Erzurum %12,32. Literatürde bildirilen en düşük soğutma enerjisi tasarrufu oranı %1 iken, en yüksek oran %90'a kadar ulaşmıştır (Lei ve diğ., 2018). Pekin'de (Çin) yapılan bir çalışmada, 30 mm FDM kullanımının %17'ye kadar enerji tasarrufu sağladığı belirlenmiştir (Chen ve diğ., 2008). Akdeniz ikliminin hakim olduğu beş farklı şehirde – Ankara (Türkiye), Atina (Yunanistan), Napoli (İtalya), Marsilya (Fransa) ve Sevilla (İspanya) – en düşük soğutma enerjisi 30 mm FDM kullanımıyla sağlanmıştır (Ascione ve diğ., 2014). Başka bir çalışmada (Ferreira ve diğ., 2012), 25 mm FDM'in, 19 mm FDM'e kıyasla daha

etkili SDA sağladığı ve daha yüksek soğutma enerjisi tasarrufu sunduğu bulunmuştur. Bu çalışmada elde edilen ideal 30 mm FDM ile sağlanan soğutma enerjisi tasarruf oranları, önceki çalışmaların sonuçlarıyla uyumludur.

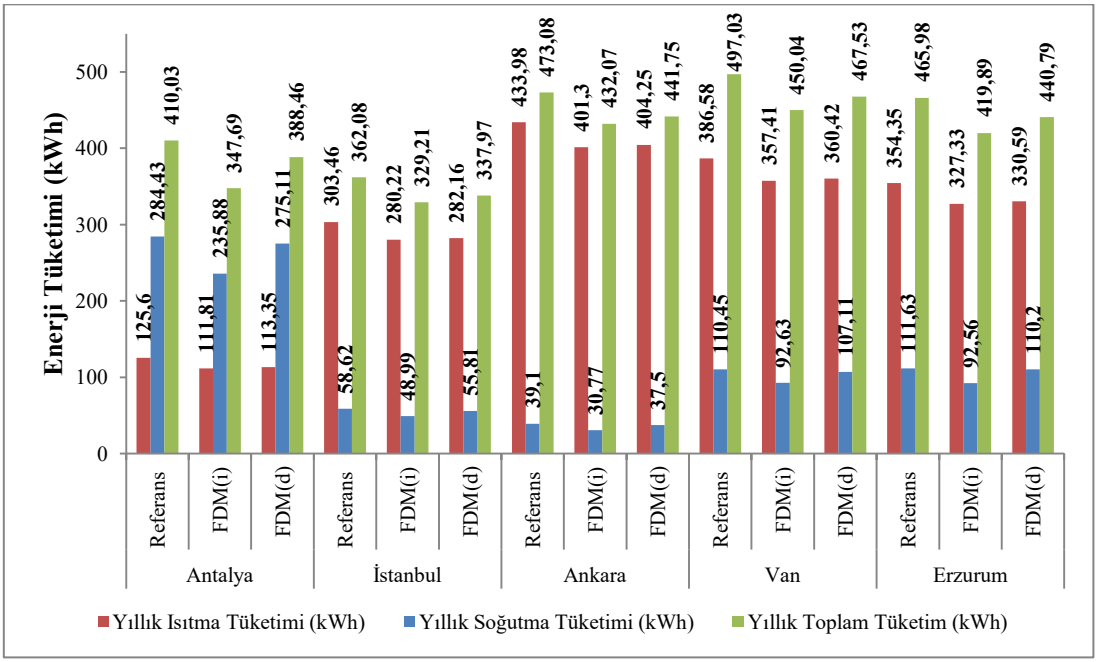
FDM'nin erime sıcaklığı, soğutma enerjisi tasarrufu üzerinde, ısıtma enerjisinin aksine ters yönde bir etki göstermiştir. Bütün iklim bölgelerinde, FDM-27, FDM-21'e kıyasla daha yüksek soğutma enerjisi tasarrufu sağlamıştır. Çünkü, sıcak yaz koşullarında, öğle saatlerinde ortam sıcaklığı 21 °C'ye ulaştığında FDM-21 hemen faz değiştirmeye ve enerji depolamaya başlamasına rağmen, FDM-27 henüz katı haldedir. FDM-27'nin faz değiştirmeye başladığı 27 °C'de ise FDM-21 tamamen erimiş haldedir. Dolayısıyla, FDM-27 yaz döneminde iç ortamda maksimum SDA sağlamakta ve dolayısıyla HVAC sistemine olan ihtiyacın azalmasına daha fazla katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmada elde edilen veriler simülasyon yöntemiyle yürütülen diğer araştırmaların bulgularıyla kıyaslanmıştır. Buna göre, iki Avrupa şehrinde (Chambéry (Fransa, ılıman iklim) ve Catania (İtalya, (sıcak Akdeniz iklimi)) belirlenen ideal FDM erime sıcaklığı olan 29 ºC, %2,5-7,2 oranında soğutma enerjisi tasarrufu sağlamıştır (Evola ve diğ., 2013). Tropikal Singapur iklimi için belirlenen ideal FDM erime sıcaklığı 28 ºC olup, %11-32 oranında soğutma enerjisi tasarrufu sunmuştur (Lei ve Yang, 2016). Bu çalışmada, Türkiye'deki çeşitli iklim koşulları altında kış dönemi boyunca FDM-21, yaz dönemi boyunca FDM-27 kullanılarak elde edilen ısıtma ve soğutma enerjisi tasarruf oranları, literatürdeki bulgularla uyumludur.

Referans ve ideal performans gösteren FDM(i) ve FDM(d) duvar kesitlerinin yıllık toplam ısıtma-soğutma enerjisi ve toplam enerji tüketimi değerleri Şekil 5.47.'de verilmiştir. Bu karşılaştırmada, FDM kalınlığı olarak ideal 30 mm sabit tutulmuştur.

Şekil 5.47.'ye göre Ankara, Van ve Erzurum illerinin ısıtma gereksinimi yüksek iller olduğu, buna karşılık Antalya ve İstanbul illerinin soğutma gereksinimi yüksek iller olduğu anlaşılmaktadır. Antalya ve İstanbul gibi daha ılıman ve nemli iklim koşullarına sahip bölgelerde, Antalya'da soğutma yükü (284,43 kWh) belirgin biçimde yüksek olup, FDM kullanımıyla bu değer 235,88 kWh'ye düşürülmüştür. Bu durum, Antalya gibi sıcak iklim bölgelerinde FDM'nin özellikle soğutma dönemlerinde etkin performans sağladığını ortaya koymaktadır. İstanbul'da referans yapıya nazaran belirgin

şekilde azalan yıllık toplam enerji tüketimi (337,97 kWh), FDM(i) konumunun bu iklim kuşağında da etkin bir enerji performansı sunduğunu göstermektedir.



Şekil 5.47. Referans ve ideal performans gösteren FDM(i) ve FDM(d) duvar kesitlerinin yıllık toplam ısıtma-soğutma enerjisi ve toplam enerji tüketimi değerleri

Ankara'da, FDM ile birlikte gerek ısıtma gerekse soğutma enerji tüketimlerinde önemli düşüşler kaydedilmiştir. Referans durumda tüketim 473,08 kWh iken, FDM(i) entegrasyonu ile bu değer 432,07 kWh'ye düşmektedir. Bu durum Ankara'nın karasal iklim koşullarında FDM'nin ısıl kütle etkisiyle iç ortam sıcaklıklarını daha dengeli hâle getirdiğini, böylece HVAC sistemlerinin daha düşük enerji ile çalıştığını göstermektedir.

Yıllık toplam enerji tüketiminin en yüksek olduğu ilin Van (497,03 kWh) olduğu görülmektedir. Bu durum, Van'ın hem uzun ve soğuk kış koşullarına sahip olması hem de gündüz-gece sıcaklık farklarının belirgin olması nedeniyle yüksek ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyacına yol açmasından kaynaklanmaktadır. Van'da referans yapıda yıllık ısıtma tüketimi 386,58 kWh, soğutma tüketimi ise 110,45 kWh olarak gerçekleşmiştir. FDM(i) ile toplam tüketim 450,04 kWh'ye, FDM(d) ile 467,53 kWh'ye düşmektedir. Erzurum'da da benzer bir eğilim gözlemlenmiştir. Erzurum'un karasal iklim koşulları nedeniyle ısıtma yükü 354,35 kWh'ye kadar çıkmakta, yaz döneminde ise nispeten düşük de olsa soğutma yükü (111,63 kWh) önemli hale gelmektedir.

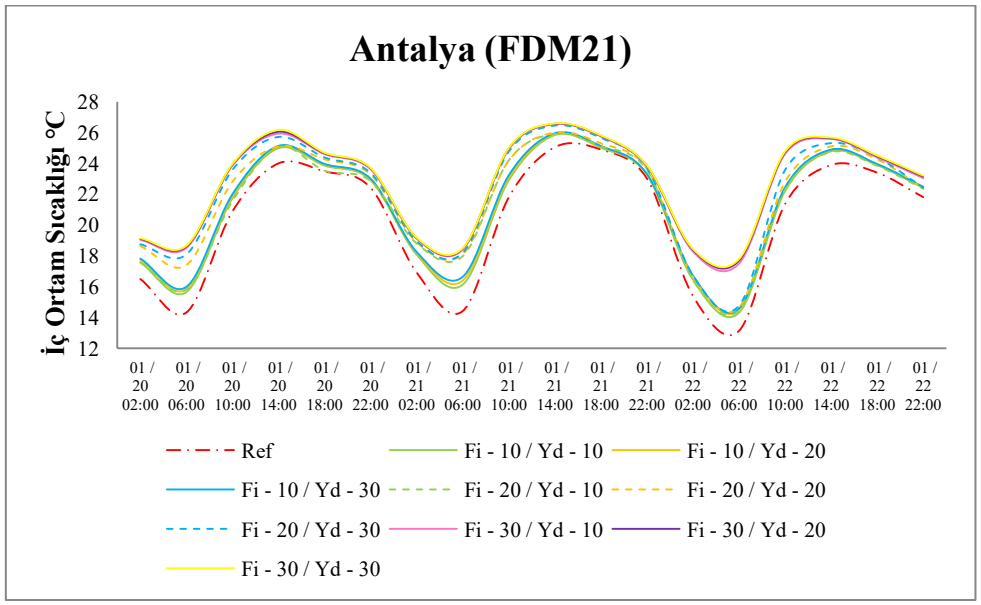
Tüm bölgelerde, FDM(i) duvar kesitinin, FDM(d) duvar kesitine nazaran daha düşük enerji tüketimi sağladığı görülmektedir. Bu durum, FDM'nin iç ortam sıcaklık dalgalanmalarını absorbe etme kapasitesinin, FDM(i) ile daha verimli bir şekilde kullanıldığını ortaya koymaktadır. FDM(i) entegrasyonu ile elde edilen bu performans, hem ısıtma hem de soğutma dönemlerinde iç mekanın termal konfor koşullarına daha az enerjiyle ulaşılabildiğini göstermektedir.

5.2. FDM ve IY İçeren Yapı Kabuğuna Ait Bulgular

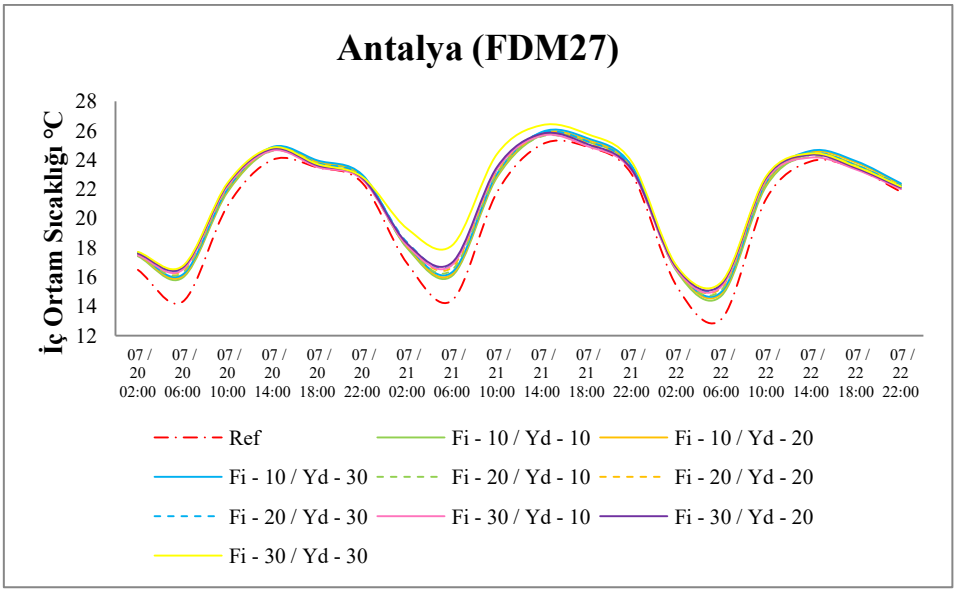
5.2.1. FDM ve IY Konumu, Kalınlığı ve FDM Erime Sıcaklığının Isıl Performans Üzerindeki Etkisi

- Antalya'da referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların kış ayında iç ortam sıcaklık dalgalanması:

FDM ve IY entegre edilen yapı kabuğunun ısıl performansı üzerinde FDM ve IY'nın konumu, kalınlığı ve FDM'nin erime sıcaklığının etkisini belirlemek amacıyla Antalya'da Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanmaları Şekil 5.48. ve Şekil 5.49.'da verilmiştir.



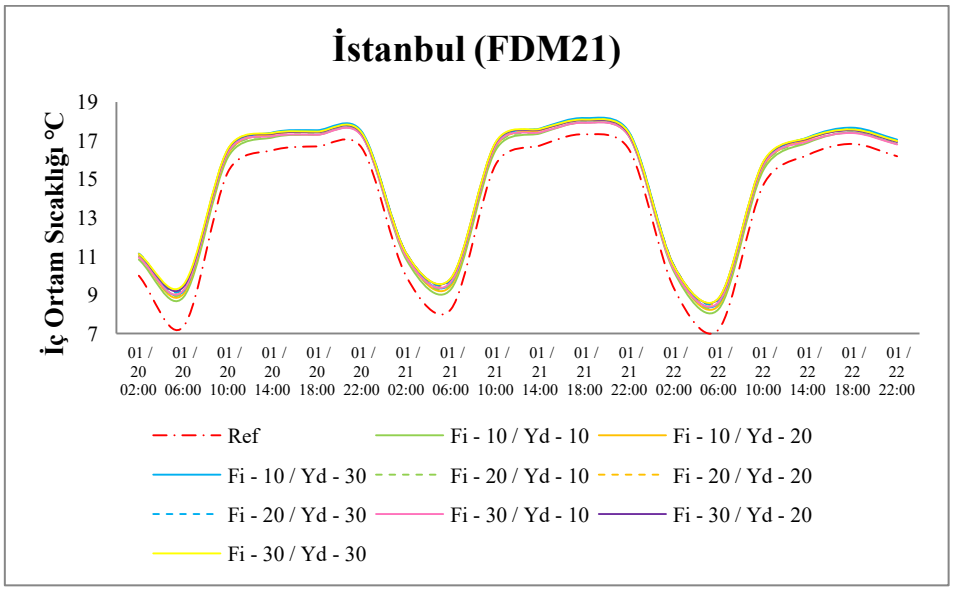
Şekil 5.48. Antalya'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması



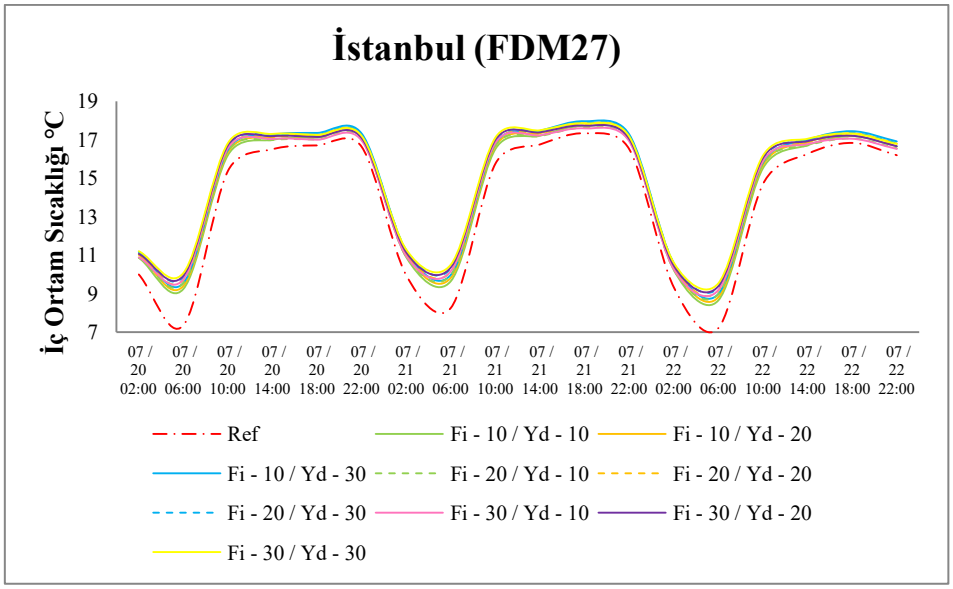
Şekil 5.49. Antalya'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması: (a) FDM-21 ºC; (b) FDM-27 ºC

- İstanbul'da referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların kış ayında iç ortam sıcaklık dalgalanması:

FDM ve IY entegre edilen yapı kabuğunun ısıl performansı üzerinde FDM ve IY'nın konumu, kalınlığı ve FDM'nin erime sıcaklığının etkisini belirlemek amacıyla İstanbul'da Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanmaları Şekil 5.50. ve Şekil 5.51.'de verilmiştir.



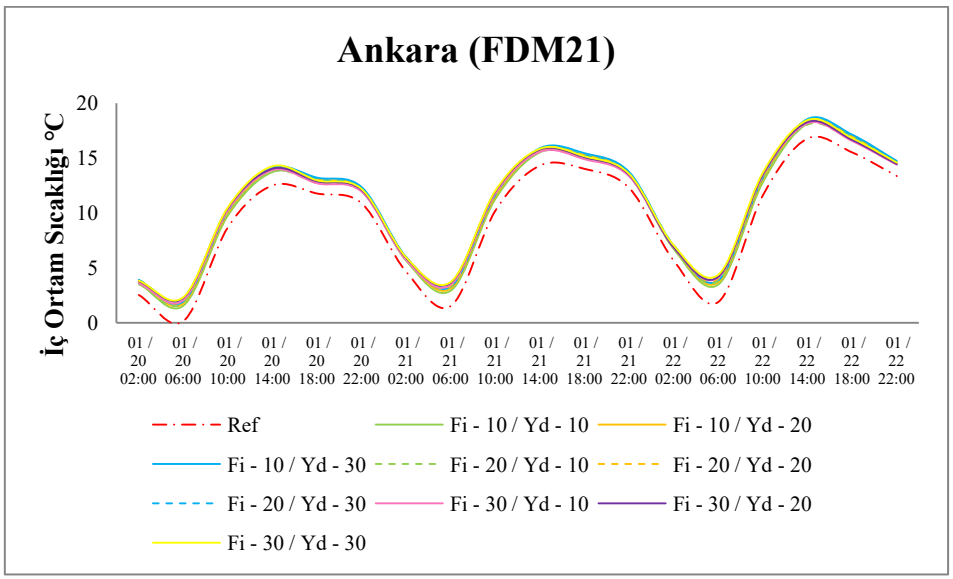
Şekil 5.50. İstanbul'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması



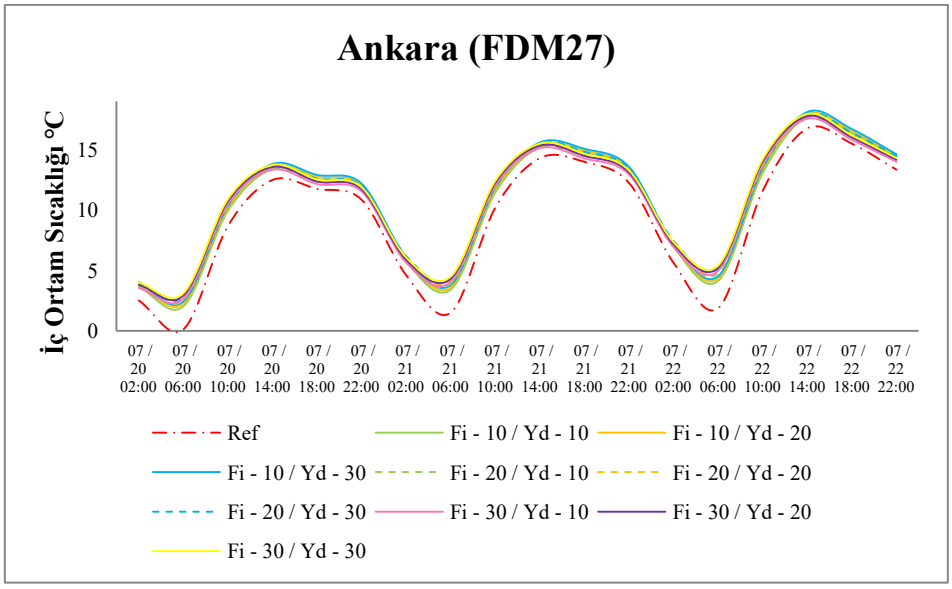
Şekil 5.51. İstanbul'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması

- Ankara'da referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların kış ayında iç ortam sıcaklık dalgalanması:

FDM ve IY entegre edilen yapı kabuğunun ısıl performansı üzerinde FDM ve IY'nın konumu, kalınlığı ve FDM'nin erime sıcaklığının etkisini belirlemek amacıyla Ankara'da Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanmaları Şekil 5.52. ve Şekil 5.53.'te verilmiştir.



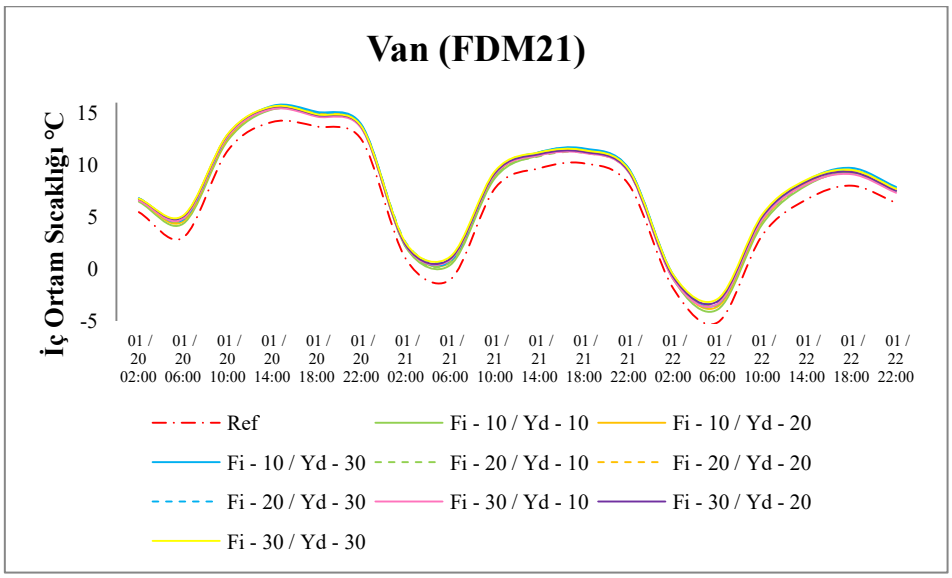
Şekil 5.52. Ankara'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması



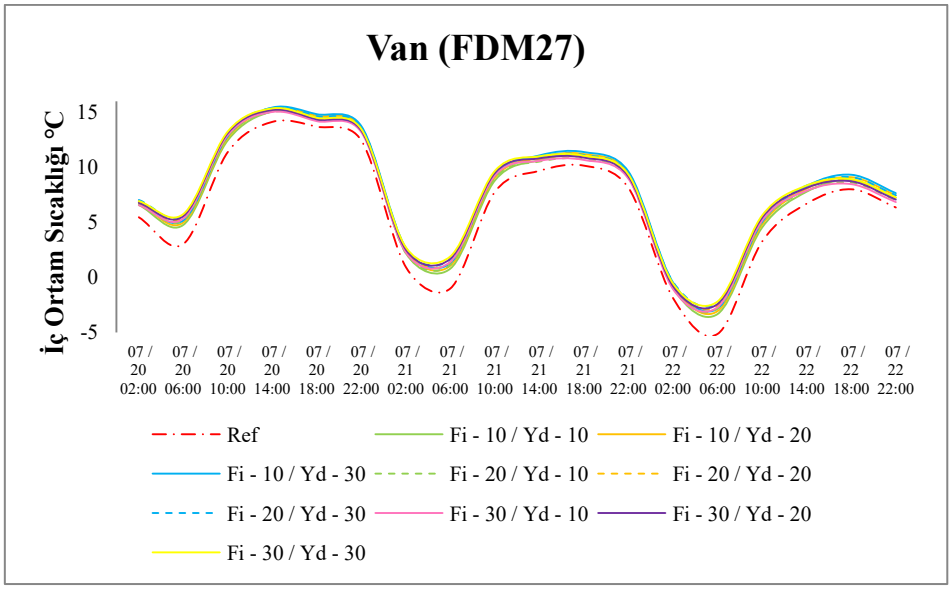
Şekil 5.53. Ankara'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması

- Van'da referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların kış ayında iç ortam sıcaklık dalgalanması:

FDM ve IY entegre edilen yapı kabuğunun ısıl performansı üzerinde FDM ve IY'nın konumu, kalınlığı ve FDM'nin erime sıcaklığının etkisini belirlemek amacıyla Van'da Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanmaları Şekil 5.54. ve Şekil 5.55.'te verilmiştir.



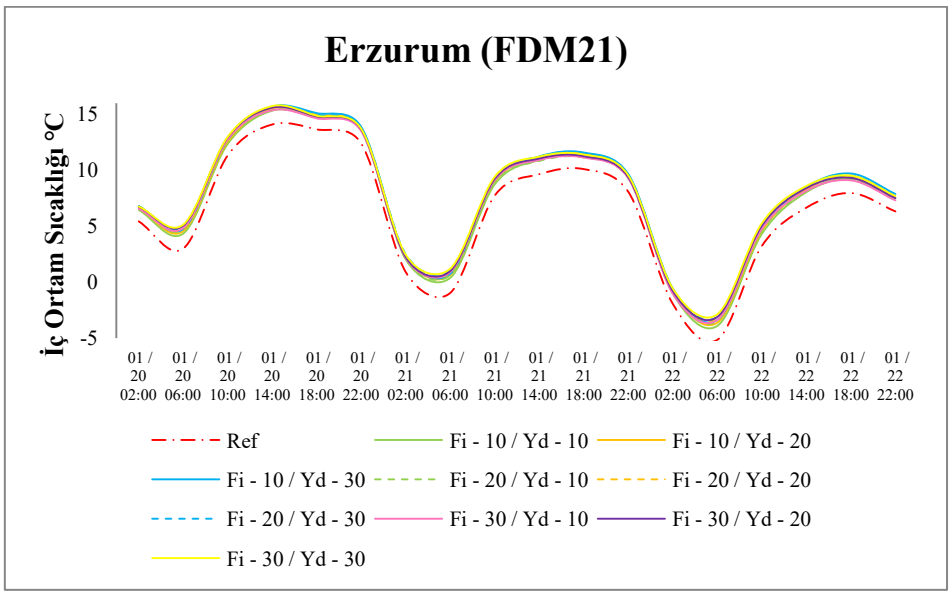
Şekil 5.54. Van'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması



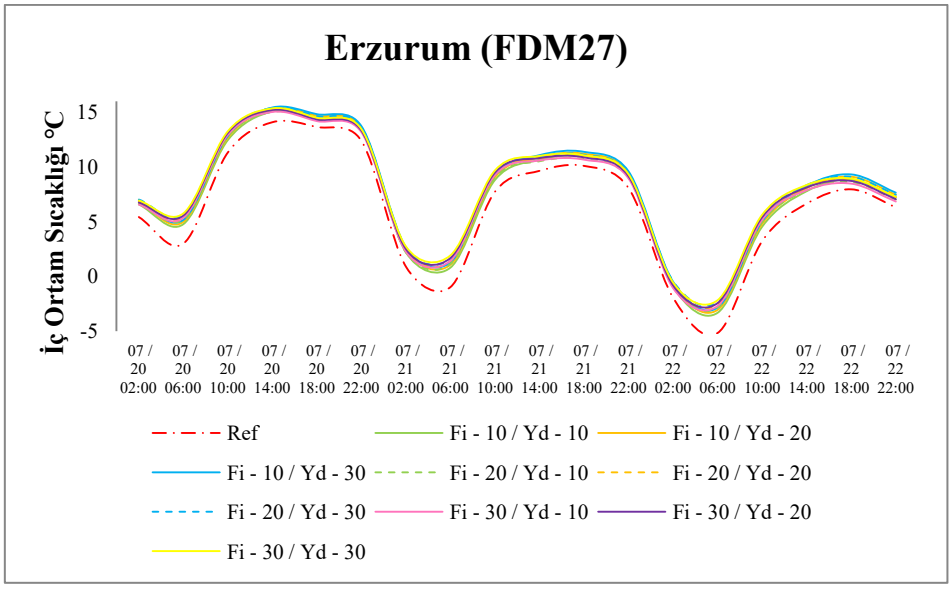
Şekil 5.55. Van'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması

- Erzurum'da referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların kış ayında iç ortam sıcaklık dalgalanması:

FDM ve IY entegre edilen yapı kabuğunun ısıl performansı üzerinde FDM ve IY'nın konumu, kalınlığı ve FDM'nin erime sıcaklığının etkisini belirlemek amacıyla Erzurum'da Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanmaları Şekil 5.56. ve Şekil 5.57.'de verilmiştir.



Şekil 5.56. Erzurum'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması



Şekil 5.57. Erzurum'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların Ocak ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması

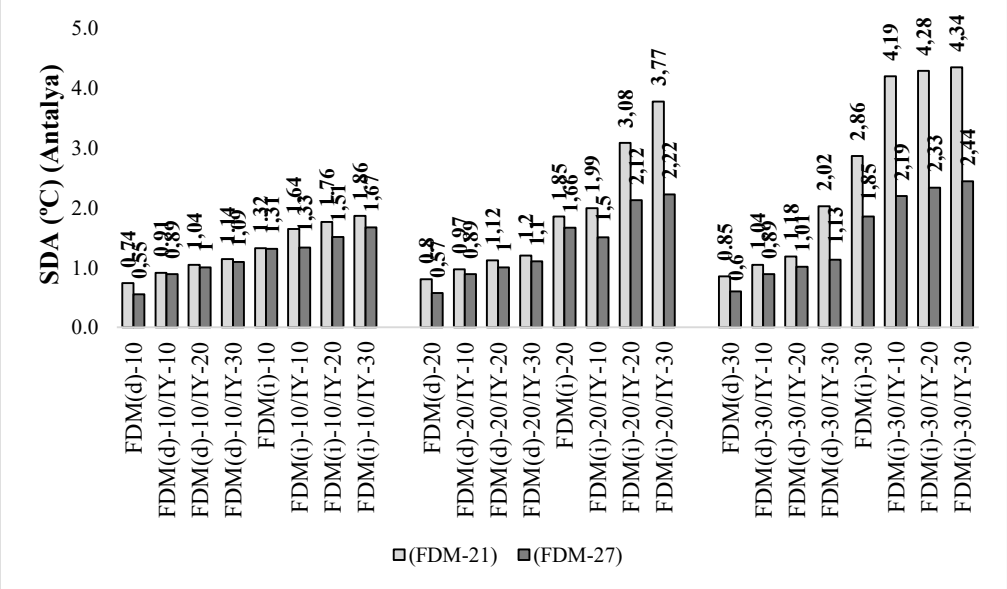
Kış döneminde bütün iklim bölgelerinde en yüksek ve en düşük iç ortam sıcaklıkları sırayla 14.00-18.00 ve 06.00'da tespit edilmiştir. Ocak ayındaki üç pik gün için referans binanın en yüksek iç ortam sıcaklığı Antalya'da 25,05 ºC, İstanbul'da 17,33 ºC, Ankara'da 16,77 ºC, Van'da 14,12 ºC ve Erzurum'da 14,09 ºC'dir. Antalya, İstanbul, Ankara, Van ve Erzurum'daki referans yapıların gece saatlerindeki iç ortam sıcaklıklarının en düşük değeri ise sırasıyla 13,13 ºC, 7,22 ºC, 0,15 ºC, 5,12 ve -5,15 ºC'dir. Sıcaklık dalgalanmalarının en yoğun yaşandığı yapı kabuğu referans duvar kesitidir. Referans duvar kesitine iç ya da dış bölgeden FDM ve dış bölgeden IY entegre edilmesi durumunda SDA gözlenmektedir. Bir diğer deyişle, yapı kabuğunda yer alan FDM ve IY, dış ortamdaki ani sıcaklık değişimlerinin iç ortamı etkilemesini önleyerek kullanıcıların iç ortamda ısıl açıdan daha konforlu hissetmesine olanak tanımıştır. Özellikle FDM ve IY içeren kesitlerin gece saatlerinde referans yapıya nazaran daha yüksek iç ortam sıcaklığı sağlaması ertesi gün HVAC sistemine daha az gereksinim duyulan bir iç ortama olanak tanımaktadır.

- Referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların kış ayında iç ortam sıcaklık dalgalanmalarında azalma kabiliyeti:

Kış döneminde SDA miktarının FDM ve IY'nın konumu, kalınlığı ve FDM'nin erime sıcaklığına bağlı olarak değişimi sırasıyla Şekil 5.58., Şekil 5.59., Şekil 5.60., Şekil

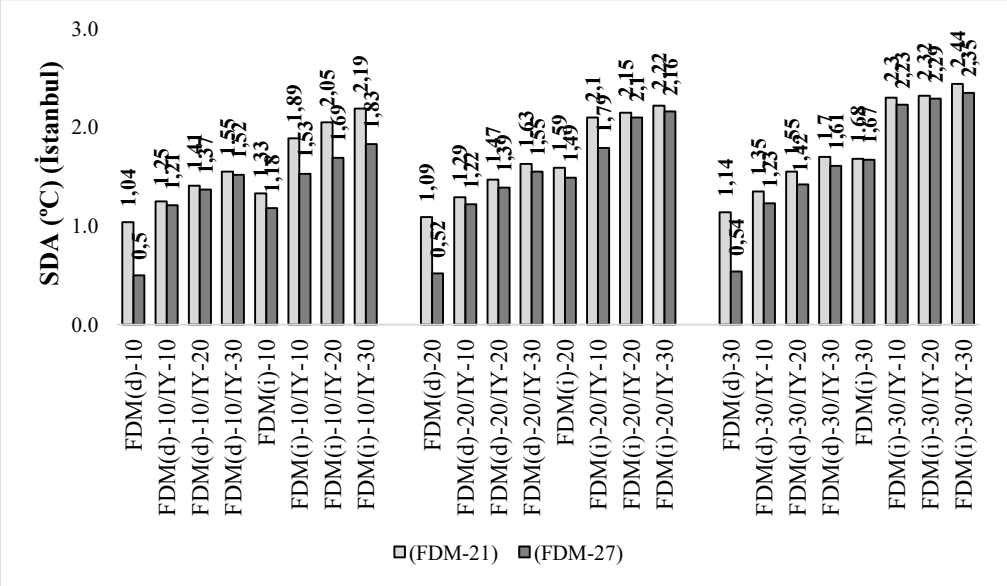
5.61. ve Şekil 5.62.'de verilmiştir.

21 ºC erime sıcaklığına sahip yalnızca FDM(i) Antalya'da 0,85 ºC SDA sağlarken, dış bölgeden IY eklendiğinde 0,90 ºC'ye kadar SDA elde edilmiştir (Şekil 5.58.).



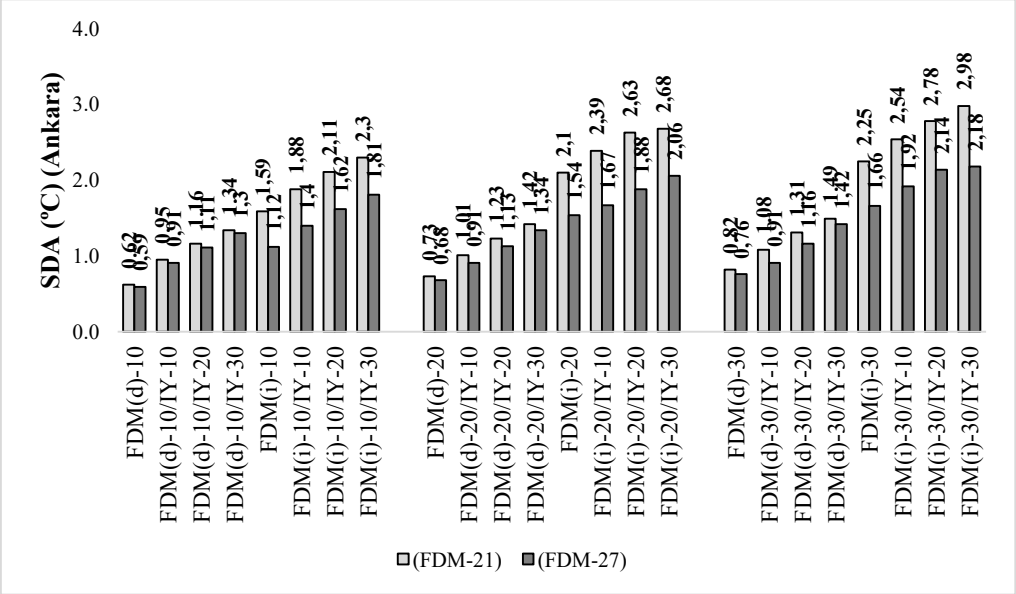
Şekil 5.58. Antalya'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının kış döneminde iç ortamın SDA'sı üzerindeki etkileri

21 ºC erime sıcaklığına sahip yalnızca FDM(i) İstanbul'da 0,50 ºC SDA sağlarken, dış bölgeden IY eklendiğinde 1,75 ºC'ye kadar SDA elde edilmiştir (Şekil 5.59.).



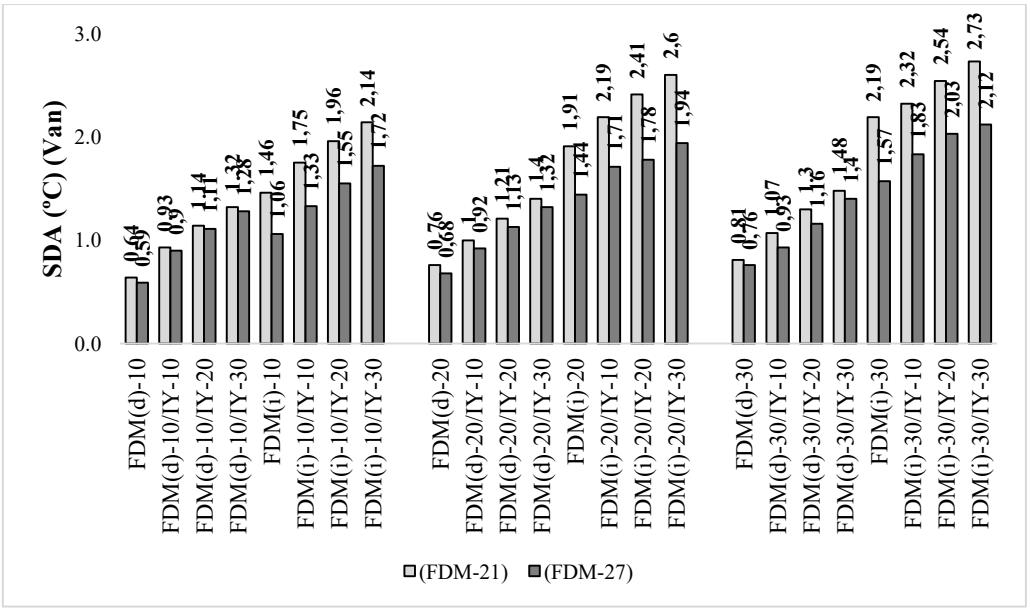
Şekil 5.59. İstanbul'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının kış döneminde iç ortamın SDA'sı üzerindeki etkileri

21 ºC erime sıcaklığına sahip yalnızca FDM(i) Ankara'da 0,57 ºC SDA sağlarken, dış bölgeden IY eklendiğinde 1,51 ºC'ye kadar SDA elde edilmiştir (Şekil 5.60.).



Şekil 5.60. Ankara'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının kış döneminde iç ortamın SDA'sı üzerindeki etkileri

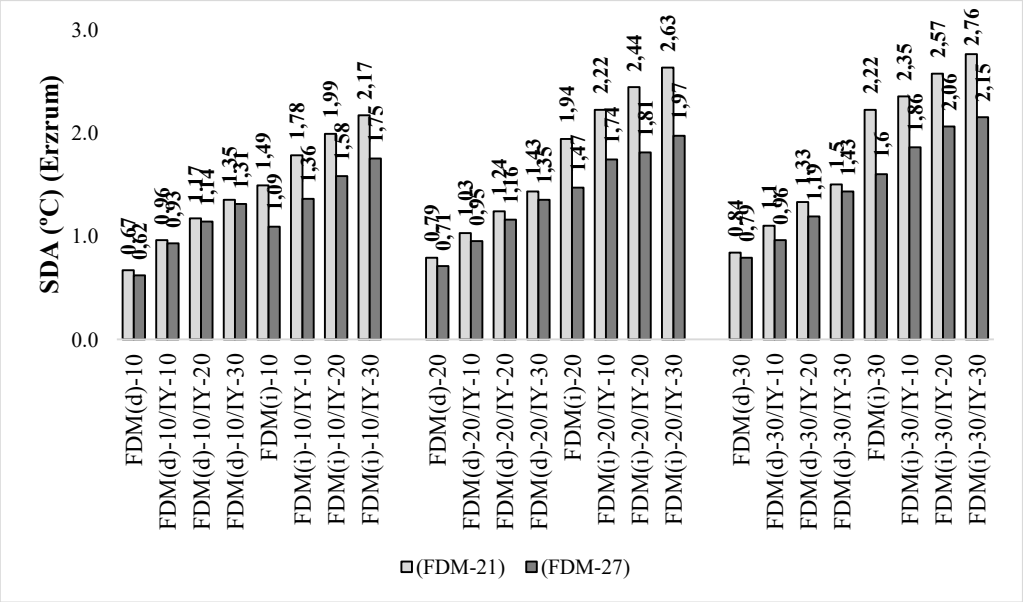
21 ºC erime sıcaklığına sahip yalnızca FDM(i) Van'da 0,72 ºC SDA sağlarken, dış bölgeden IY eklendiğinde 1,66 ºC'ye kadar SDA elde edilmiştir (Şekil 5.61.).



Şekil 5.61. Van'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının kış döneminde iç ortamın SDA'sı üzerindeki etkileri

21 ºC erime sıcaklığına sahip yalnızca FDM(i) Erzurum'da 0,75 ºC SDA sağlarken, dış

bölgeden IY eklendiğinde 1,68 ºC'ye kadar SDA elde edilmiştir (Şekil 5.62.).



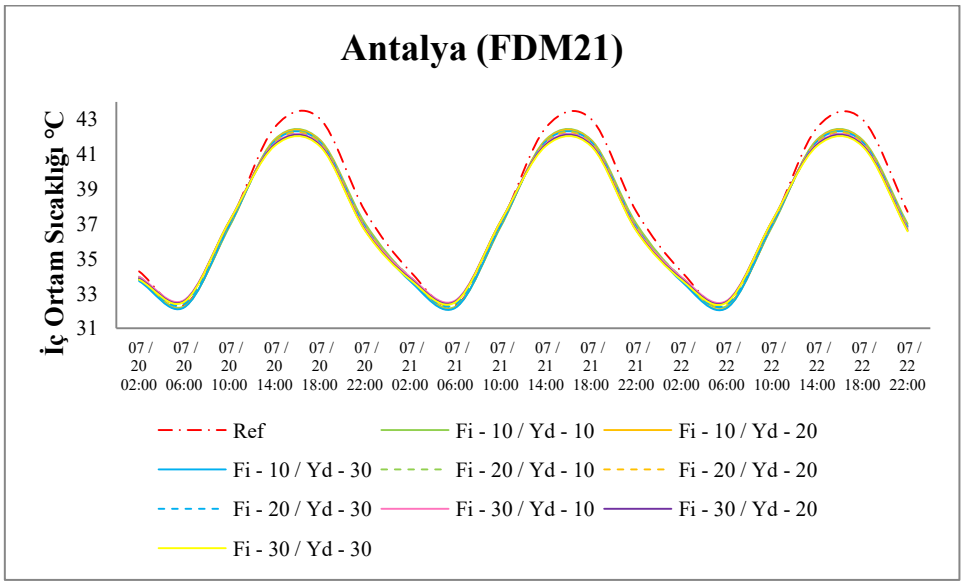
Şekil 5.62. Erzurum'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının kış döneminde iç ortamın SDA'sı üzerindeki etkileri

Kış döneminde en yüksek dış ortam sıcaklığının yaşandığı öğle saatlerinde (pik bölgesinde) yapı kabuğunun iç bölgesine FDM ve dış bölgesine IY entegre etmek (FDM(i)/IY, Tablo 4.2.(d)) bütün iklim bölgelerinde referans yapıya ve sadece FDM içeren kesitlere nazaran daha yüksek oranda SDA sağlamıştır. 27 ºC erime sıcaklığına sahip yalnızca FDM(i) Antalya, İstanbul, Ankara, Van ve Erzurum'da 0,50, 0,33, 0,34, 0,37, 0,38 ve 0,40 ºC sağlanırken, FDM(i)/IY entegre edilen yapılarda bu değer sırasıyla 0,68-0,84 ºC, 0,50-0,80 ºC, 0,91-1,23 ºC, 0,96-1,24 ºC ve 0,99-1,27 ºC'ye kadar artmıştır.

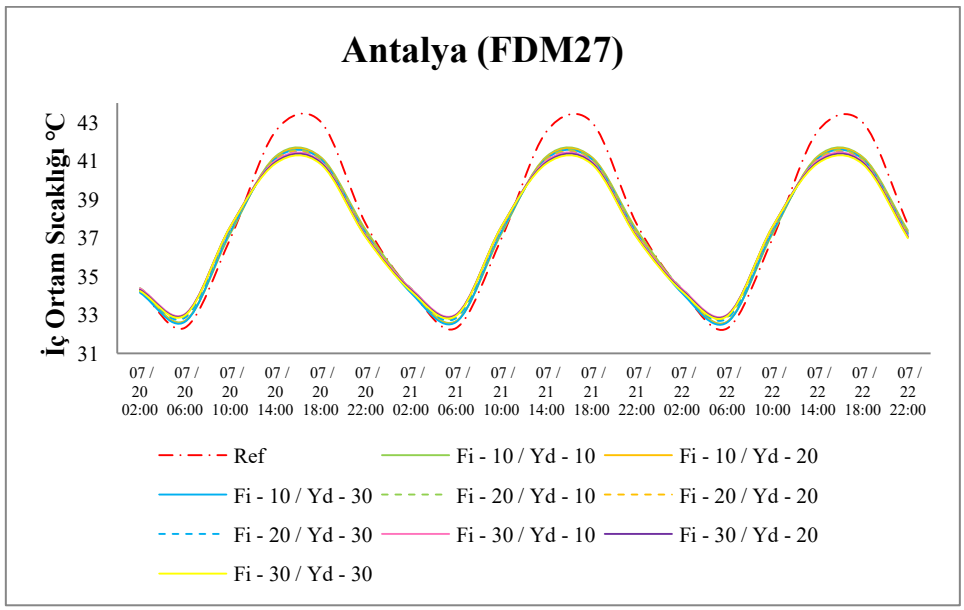
Gerek FDM(d)/IY gerekse FDM(i)/IY entegre edilmiş duvar kesitlerinde referans yapıya nazaran daha yüksek SDA değerlerinin elde edilmesi Fourier Yasası ile açıklanabilmektedir. Fourier Yasası'na göre, yapı kabuğuna ısı iletkenlik katsayısı düşük olan malzemeleri entegre etmek ısının çok yoğun ortamdan daha az yoğun ortama geçişine engel teşkil etmesinden dolayı yapı kabuğunun ısıl direncini arttırmakta ve iç mekânda konfor koşullarının sürdürülmesine olanak tanımaktadır (Garrido ve diğ., 2001). Ancak, FDM(i)/IY kesitinde elde edilen SDA değerleri bütün iklim bölgelerinde FDM(d)/IY kesitinden sağlanan SDA değerlerine nazaran daha yüksektir.

- Antalya'da referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların yaz ayında iç ortam sıcaklık dalgalanması:

FDM ve IY entegre edilen yapı kabuğunun ısıl performansı üzerinde FDM ve IY'nın konumu, kalınlığı ve FDM'nin erime sıcaklığının etkisini belirlemek amacıyla Antalya'da Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanmaları Şekil 5.63. ve Şekil 5.64.'te verilmiştir.



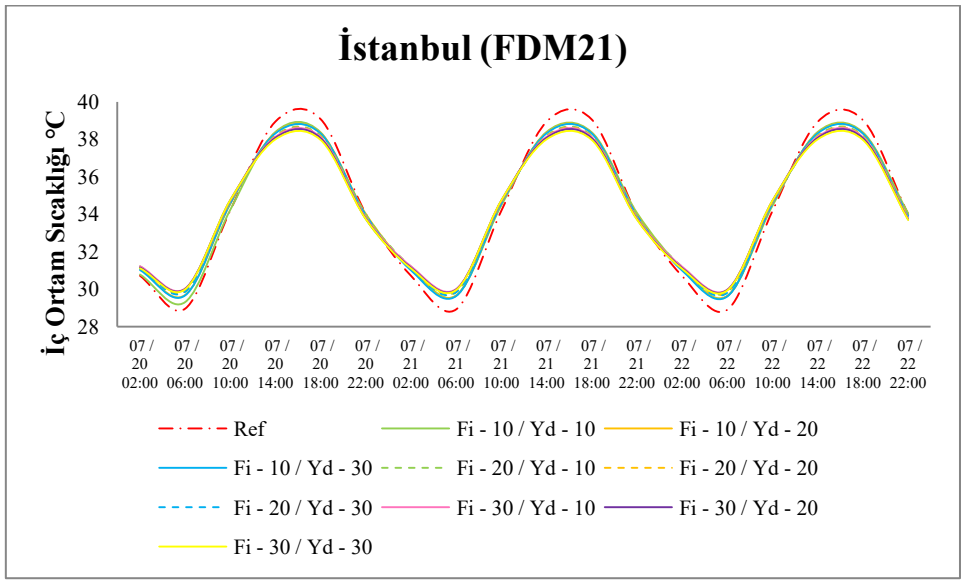
Şekil 5.63. Antalya'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması



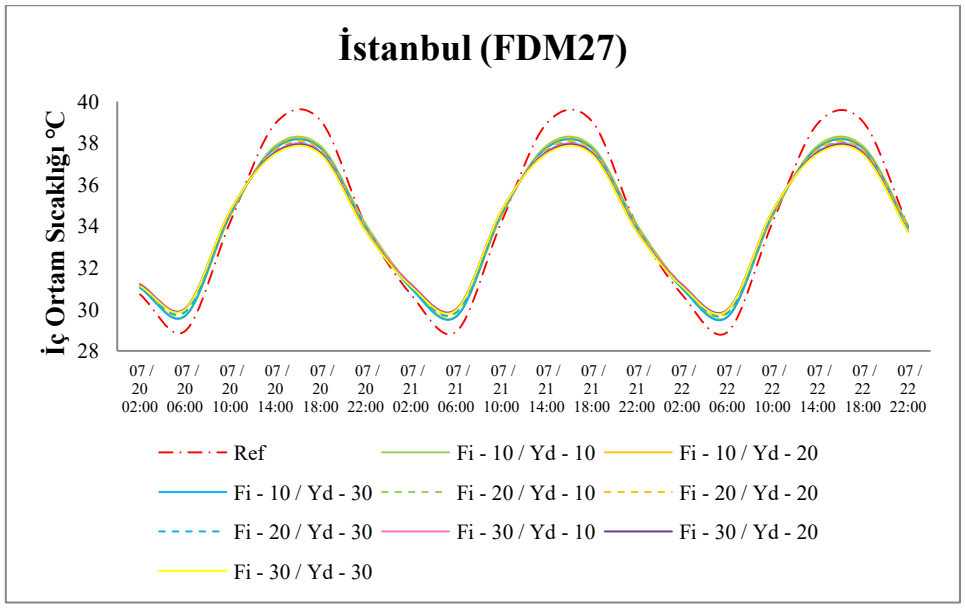
Şekil 5.64. Antalya'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması

- İstanbul'da referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların yaz ayında iç ortam sıcaklık dalgalanması:

FDM ve IY entegre edilen yapı kabuğunun ısıl performansı üzerinde FDM ve IY'nın konumu, kalınlığı ve FDM'nin erime sıcaklığının etkisini belirlemek amacıyla İstanbul'da Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanmaları Şekil 5.65. ve Şekil 5.66.'da verilmiştir.



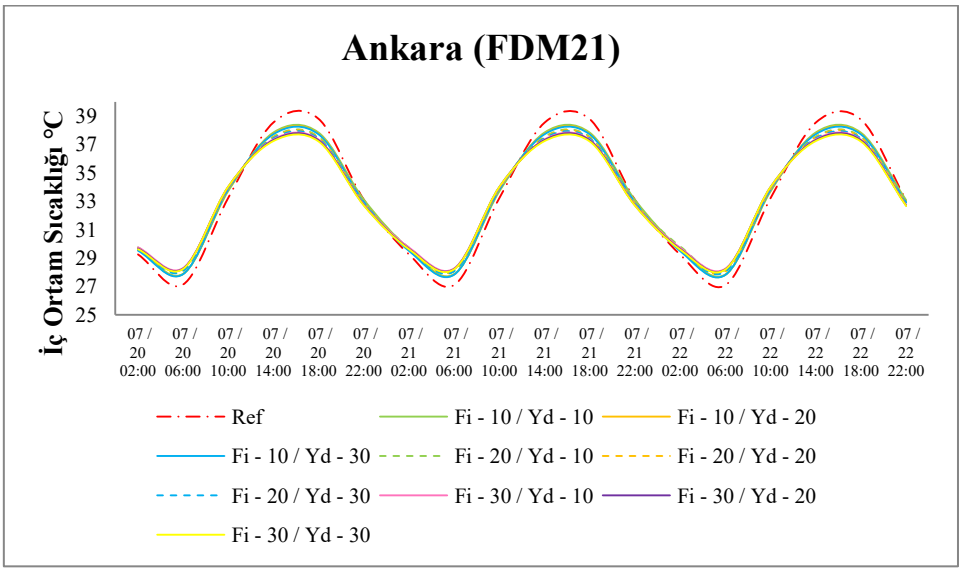
Şekil 5.65. İstanbul'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması



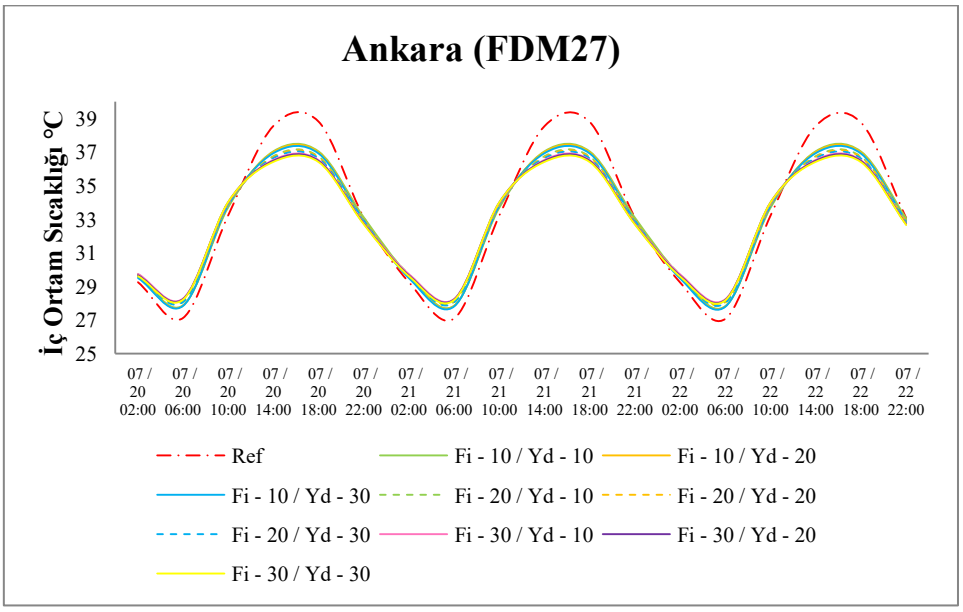
Şekil 5.66. İstanbul'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması

- Ankara'da referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların yaz ayında iç ortam sıcaklık dalgalanması:

FDM ve IY entegre edilen yapı kabuğunun ısıl performansı üzerinde FDM ve IY'nın konumu, kalınlığı ve FDM'nin erime sıcaklığının etkisini belirlemek amacıyla Ankara'da Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanmaları Şekil 5.67. ve Şekil 5.68.'de verilmiştir.



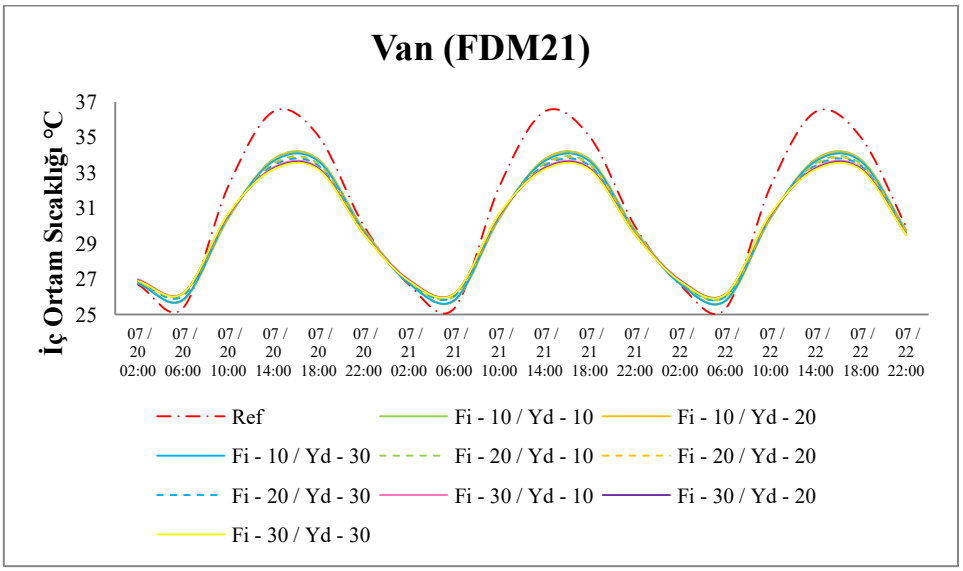
Şekil 5.67. Ankara'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması



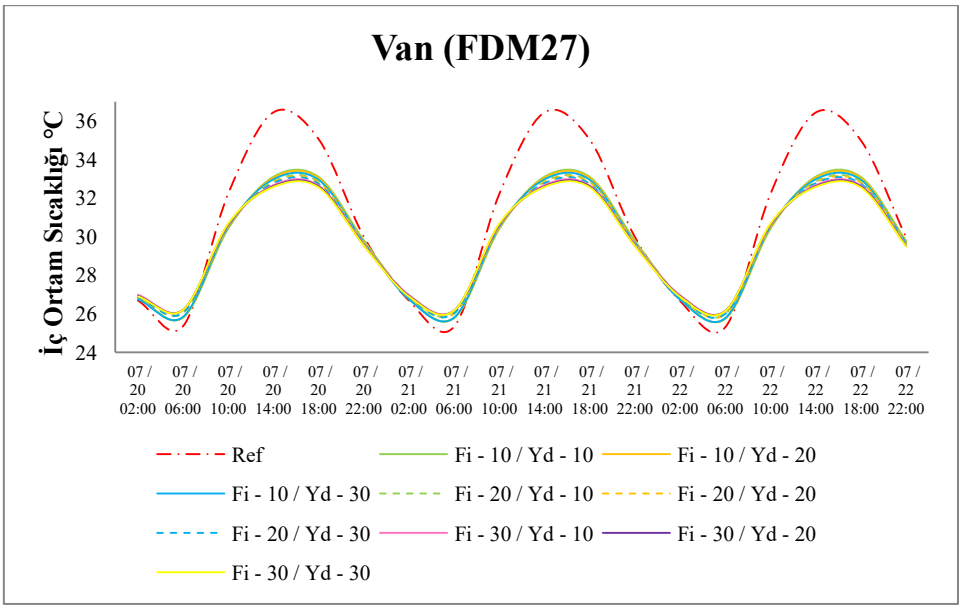
Şekil 5.68. Ankara'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması

- Van'da referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların yaz ayında iç ortam sıcaklık dalgalanması:

FDM ve IY entegre edilen yapı kabuğunun ısıl performansı üzerinde FDM ve IY'nın konumu, kalınlığı ve FDM'nin erime sıcaklığının etkisini belirlemek amacıyla Van'da Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanmaları Şekil 5.69. ve Şekil 5.70.'te verilmiştir.



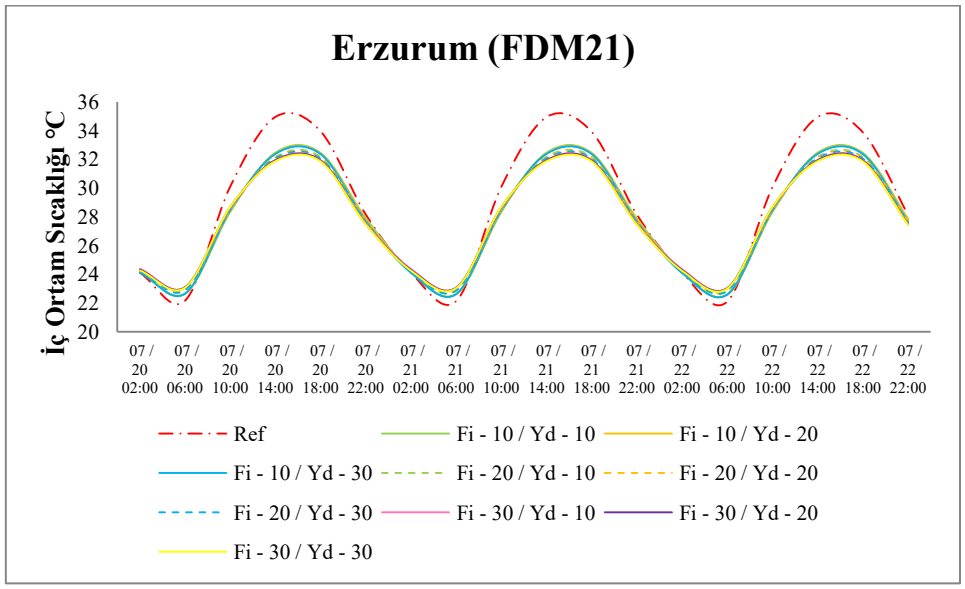
Şekil 5.69. Van'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması



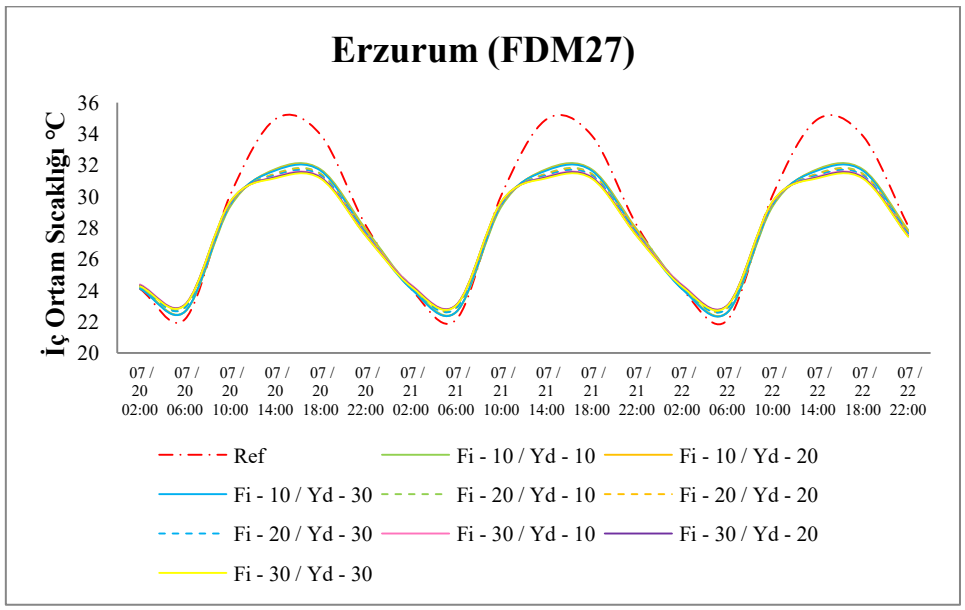
Şekil 5.70. Van'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması

- Erzurum'da referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların yaz ayında iç ortam sıcaklık dalgalanması:

FDM ve IY entegre edilen yapı kabuğunun ısıl performansı üzerinde FDM ve IY'nın konumu, kalınlığı ve FDM'nin erime sıcaklığının etkisini belirlemek amacıyla Erzurum'da Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanmaları Şekil 5.71. ve Şekil 5.72.'de verilmiştir.



Şekil 5.71. Erzurum'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması



Şekil 5.72. Erzurum'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların Temmuz ayındaki üç pik gün için iç ortam sıcaklık dalgalanması

Yaz döneminde bütün iklim bölgelerinde en yüksek iç ortam sıcaklıkları 14.00-16.00 saatleri arasında tespit edilmiştir. Temmuz ayındaki üç pik gün için referans binada en yüksek iç ortam sıcaklığı Antalya'da 43 ºC, İstanbul'da 39 ºC, Ankara'da 38,5 ºC, Van'da 36,5 ºC ve Erzurum'da 34,9 ºC olarak tespit edilmiştir. Aynı tarihlerde, referans yapıların gündüz saatlerindeki iç ortam sıcaklıklarının en yüksek değeri Antalya, İstanbul, Ankara, Van ve Erzurum'da sırasıyla 42,53 ºC, 38,95 ºC, 38,8 ºC, 36,45 ºC ve 34,96 ºC'dir.

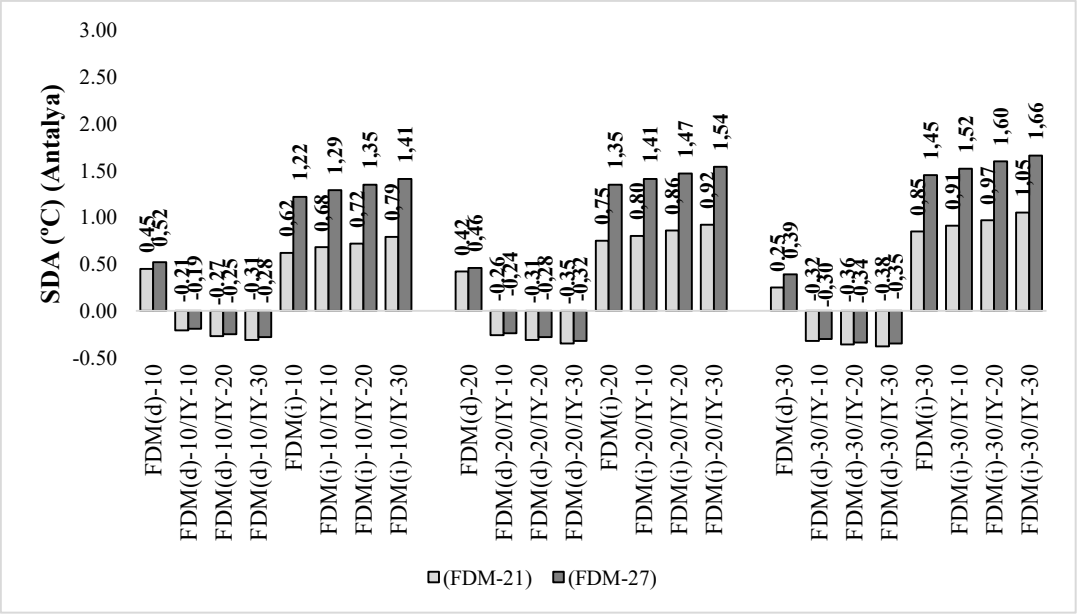
FDM ve IY en dış katmanlara yerleştirildiğinde ve IY, FDM'nin önünde konumlandırıldığında (FDM(d)/IY, Tablo 4.2.(e)), yaz döneminde tüm iklim bölgelerinde binanın iç sıcaklığının referans binadan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, FDM'nin önüne yerleştirilen IY'nin yapı kabuğunun ısıl performansını olumsuz etkilediğini göstermektedir. Bunun nedeni, çok düşük ısıl iletkenlik katsayısına (0,04 W/mK) sahip olan IY'nin, daha sıcak dış havanın yapı kabuğundan geçmesini engellemesi ve böylece FDM'nin faz dönüşümü için gerekli olan daha sıcak havaya ulaşmasını geciktirmesi olabilir. Benzer bir bulgu, Al-Yasiri ve Szabó (Al-Yasiri ve Szabo, 2023) tarafından da tespit edilmiştir. Öte yandan, bu duvar kesitinde FDM ve IY kalınlıklarının ve FDM erime sıcaklığının SDA üzerindeki etkileri ihmal edilebilir düzeydedir.

- Referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların yaz ayında iç ortam sıcaklık dalgalanmalarında azalma kabiliyeti:

Yaz döneminde SDA miktarının FDM ve IY'nın konumu, kalınlığı ve FDM'nin erime sıcaklığına bağlı olarak değişimi sırasıyla Şekil 5.73., Şekil 5.74., Şekil 5.75., Şekil 5.76. ve Şekil 5.77.'de verilmiştir.

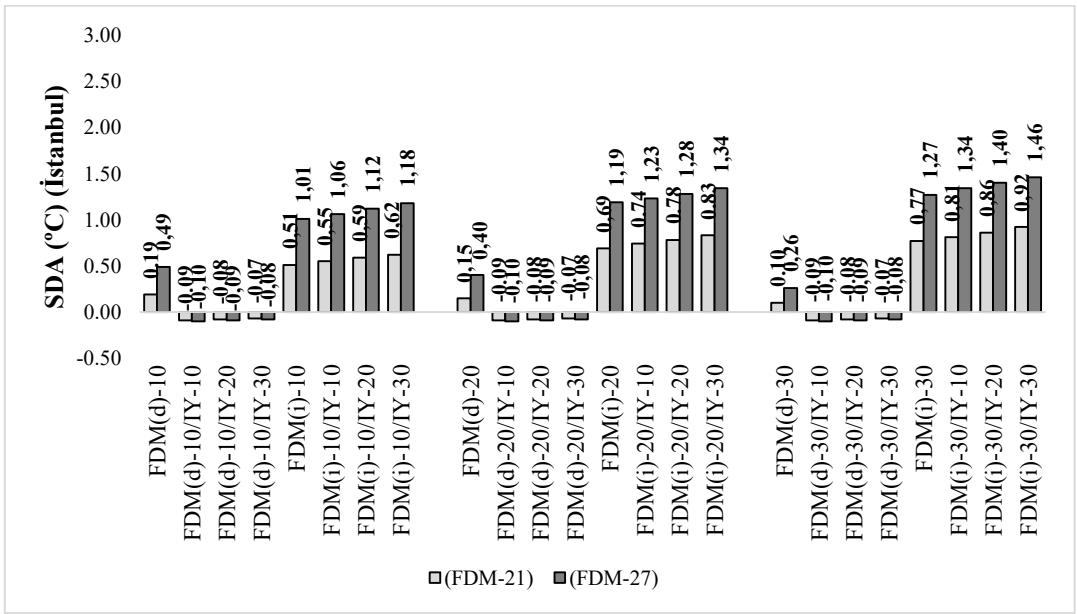
Yaz döneminde pik bölgesinde yapı kabuğunun iç bölgesine FDM ve dış bölgesine IY entegre etmek (FDM(i)/IY, Tablo 4.2.(d)) bütün iklim bölgelerinde, kış döneminde olduğu gibi, referans yapıya ve sadece FDM içeren kesitlere nazaran daha yüksek oranda SDA sağlamıştır.

21 ºC erime sıcaklığına sahip yalnızca FDM(i) Antalya'da 0,62 ºC SDA sağlarken, dış bölgeden IY eklendiğinde 0,79 ºC'ye kadar SDA elde edilmiştir (Şekil 5.73.).



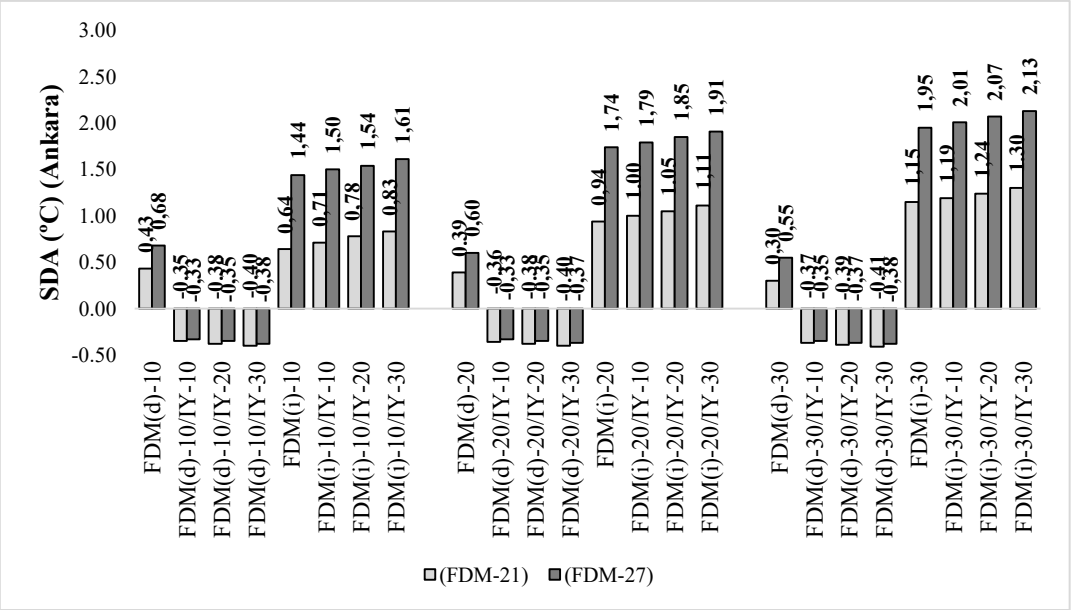
Şekil 5.73. Antalya'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının yaz döneminde iç ortamın SDA'sı üzerindeki etkileri

21 ºC erime sıcaklığına sahip yalnızca FDM(i) İstanbul'da 0,51 ºC SDA sağlarken, dış bölgeden IY eklendiğinde 0,62 ºC'ye kadar SDA elde edilmiştir (Şekil 5.74.).



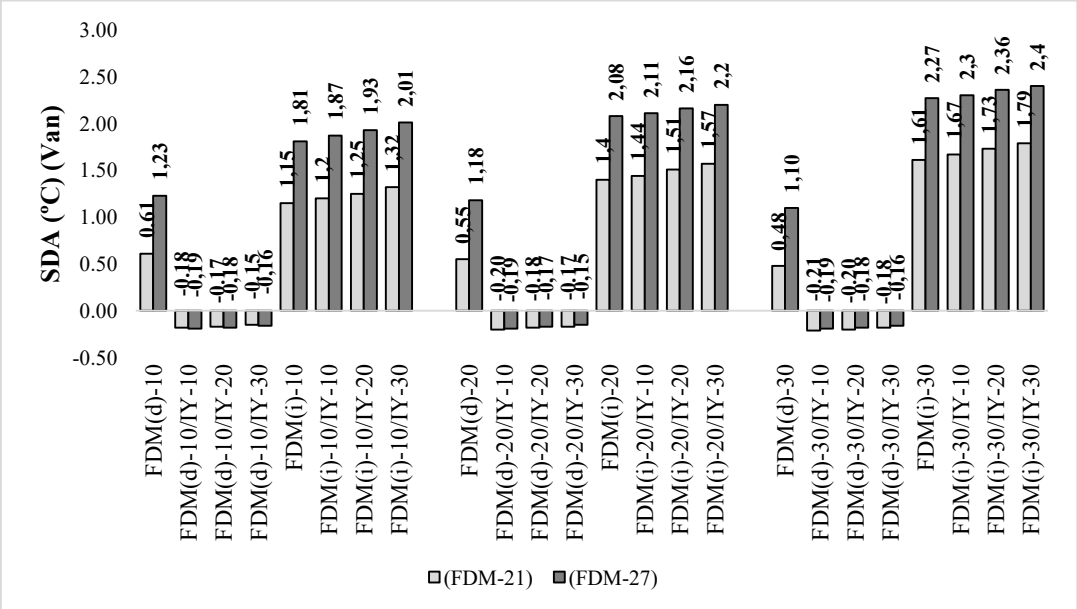
Şekil 5.74. İstanbul'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının yaz döneminde iç ortamın SDA'sı üzerindeki etkileri

21 ºC erime sıcaklığına sahip yalnızca FDM(i) Ankara'da 0,64 ºC SDA sağlarken, dış bölgeden IY eklendiğinde 0,83 ºC'ye kadar SDA elde edilmiştir (Şekil 5.75.).



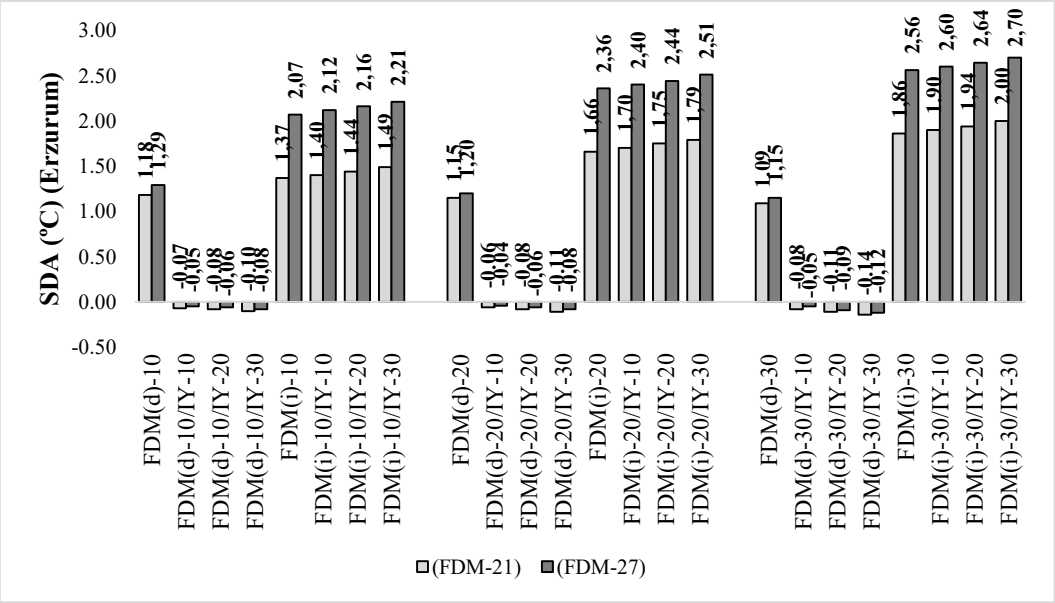
Şekil 5.75. Ankara'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının yaz döneminde iç ortamın SDA'sı üzerindeki etkileri

21 ºC erime sıcaklığına sahip yalnızca FDM(i) Van'da 1,15 ºC SDA sağlarken, dış bölgeden IY eklendiğinde 1,32 ºC'ye kadar SDA elde edilmiştir (Şekil 5.76.).



Şekil 5.76. Van'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının yaz döneminde iç ortamın SDA'sı üzerindeki etkileri

21 ºC erime sıcaklığına sahip yalnızca FDM(i) Van'da 1,37 ºC SDA sağlarken, dış bölgeden IY eklendiğinde 1,49 ºC'ye kadar SDA elde edilmiştir (Şekil 5.77.).



Şekil 5.77. Erzurum'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının yaz döneminde iç ortamın SDA'sı üzerindeki etkileri

FDM ve IY kalınlığının artırılması, SDA'yı da artırmıştır. IY kalınlığı sabit tutulduğunda, FDM kalınlığının artırılması, yalnızca FDM entegre edilen binalardakine benzer olarak, daha etkili bir SDA sağlamıştır. Öte yandan, FDM-21 kalınlığı 30 mm'de sabit tutulduğunda, 10 mm IY entegrasyonu (FDM(i)-30/IY-10), Erzurum'da referans binaya kıyasla 1,90 ºC SDA sağlamıştır. IY kalınlığı sırasıyla 20 ve 30 mm'ye artırıldığında (FDM(i)-30/IY-20 ve FDM(i)-30/IY-30), sırasıyla 1,94 ve 2.00 ºC SDA değerleri elde edilmiştir. FDM-21 yerine 10, 20 ve 30 mm kalınlıklarında FDM-27 kullanılması kış dönemindekinden daha fazla ve Erzurum'da sırasıyla 2,60, 2,70 ve 2,80 ºC'lik daha etkili bir SDA sağlamıştır (Şekil 5.77.). Bu bulgu diğer iklim bölgeleri için de geçerli olup yaz döneminde FDM-27 FDM-21'e nazaran daha etkili bir SDA sağlamaktadır. SDA en yüksek verimi Erzurum'da göstermiştir, bunu sırasıyla Van, Ankara, Antalya ve İstanbul takip etmiştir.

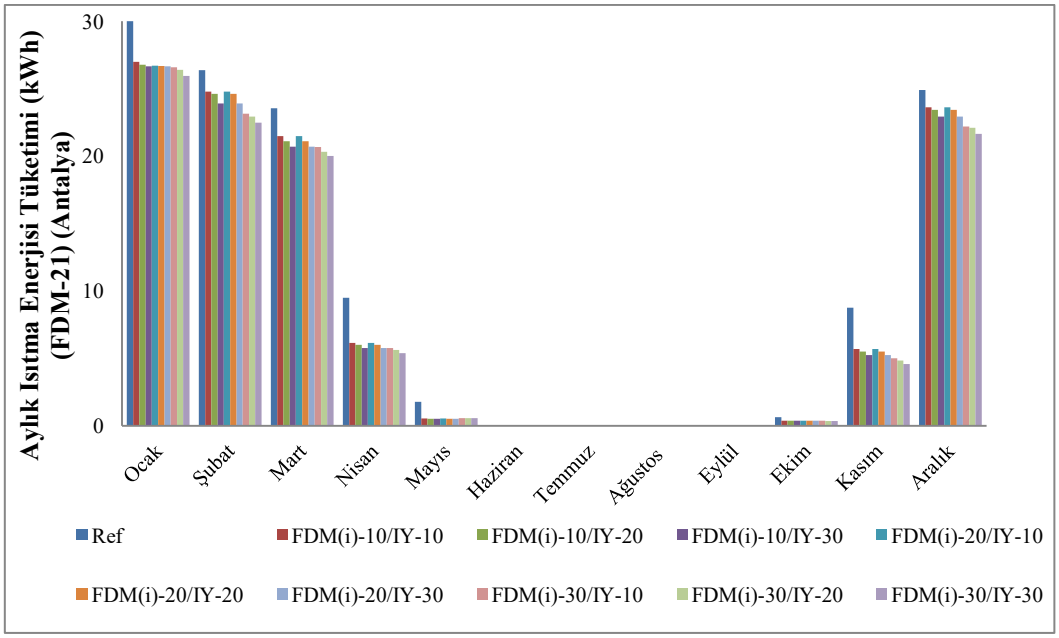
Yaz döneminde FDM ve IY entegre edilen binaların gece saatlerindeki iç mekân sıcaklıkları, referans binaya kıyasla daha yüksek olmuştur. Özellikle IY kalınlığı arttıkça, gece saatlerinde iç mekân sıcaklığında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. IY'nin düşük ısıl iletkenlik katsayısına sahip olması nedeniyle, biriken ısının iç mekândan dış ortama aktarılması zorlaşmaktadır. Ayrıca, simülasyonlarda doğal havalandırmanın etkisi devre dışı bırakıldığı için, biriken ısının ortamdan uzaklaşması daha uzun zaman almıştır.

Bu çalışmada en yüksek ısıl konforun sağlandığı FDM(i)/IY duvar kesitinde kış döneminde ideal FDM ve IY kalınlıkları 30'ar mm ve yaz döneminde FDM 30 mm, IY 10 mm olarak tespit edilmiştir. Literatür çalışmalarında iç bölgede FDM(i) ve dış bölgede IY içeren duvar kesitlerinde Atina (Yunanistan), Marsilya (Fransa), Ankara (Türkiye), Napoli (İtalya), Sevilla (İspanya) için 30 mm FDM ve 60 mm IY (Ascione ve diğ., 2014), Çin'de yer alan Harbin, Pekin, Şanghay, Yünnan ve Guangzhou ve Japonya'da yer alan Sapporo, Hachinohe, Sendai, Tokyo, kagoshima ve Naha için 25 mm FDM ve 60 mm IY (Liu ve diğ., 2023) ve İran'da yer alan Tahran, Tebriz, Reşt, Bender ve Abbas için 50 mm FDM ve 69 – 98 mm IY (Hamooleh ve diğ., 2024) ideal kalınlıklar olarak tespit edilmiştir. Nitekim bu bulgular literatür verileriyle de örtüşmektedir.

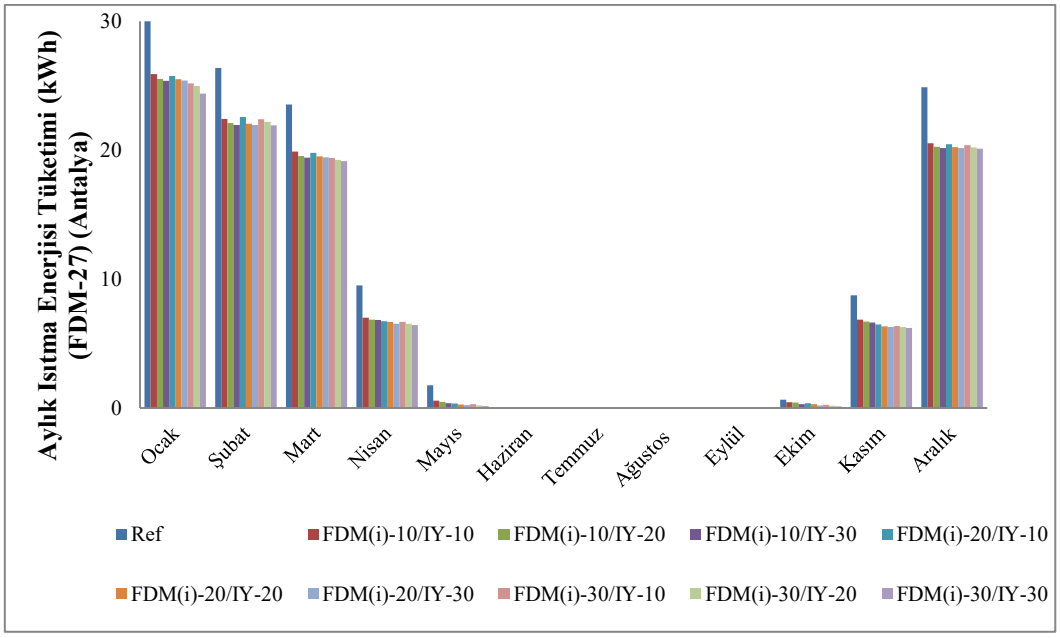
5.2.2. FDM ve IY Konumu, Kalınlığı ve FDM Erime Sıcaklığının Enerji Tasarrufu Üzerindeki Etkisi

- Antalya'da referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi:

Referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların Antalya'da kış dönemi için yıllık toplam ısıtma enerjisi tüketimi Şekil 5.78. ve Şekil 5.79.'da verilmiştir.



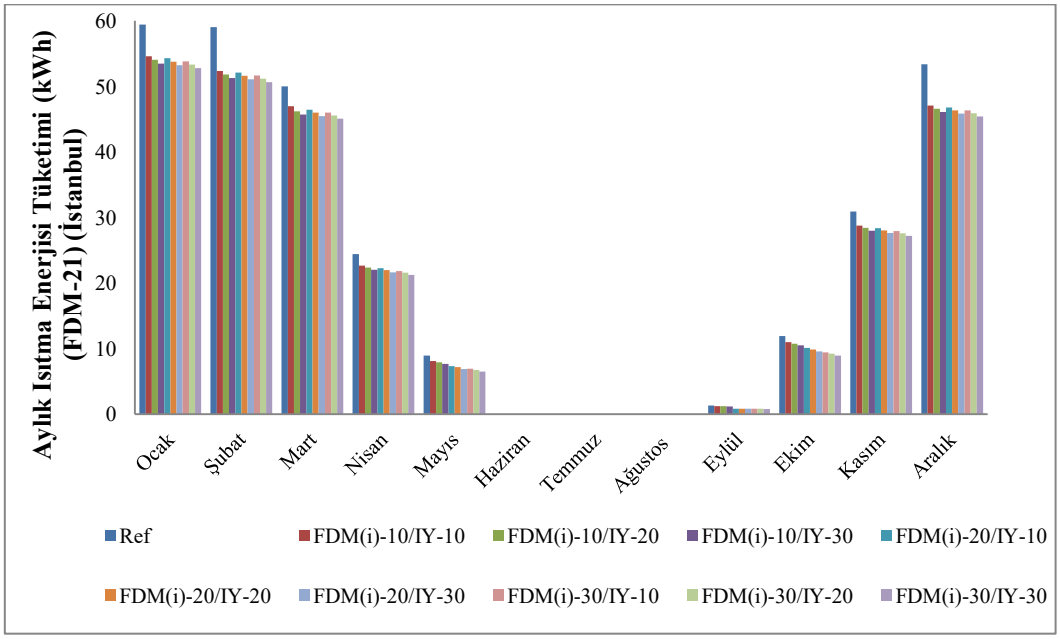
Şekil 5.78. Antalya'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi



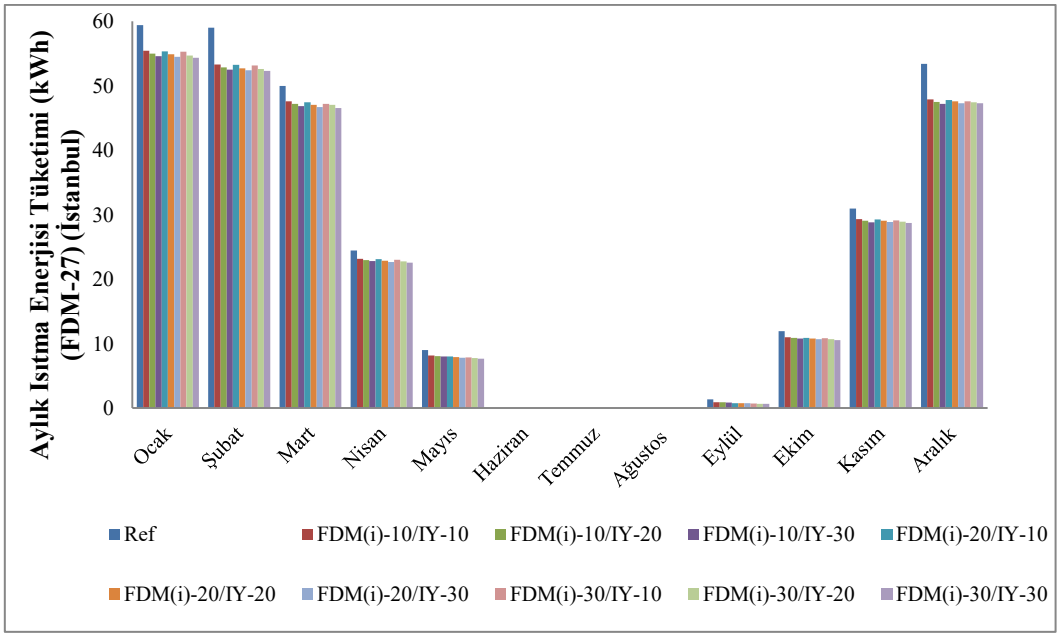
Şekil 5.79. Antalya'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi

- İstanbul'da referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi:

Referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların İstanbul'da kış dönemi için yıllık toplam ısıtma enerjisi tüketimi Şekil 5.80. ve Şekil 5.81.'de verilmiştir.



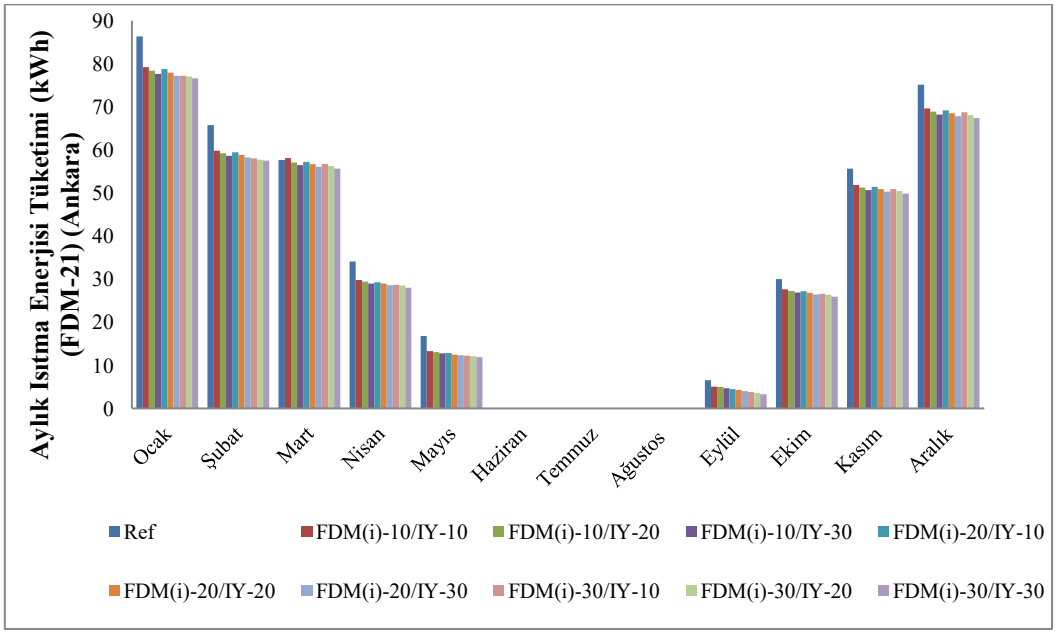
Şekil 5.80. İstanbul'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi



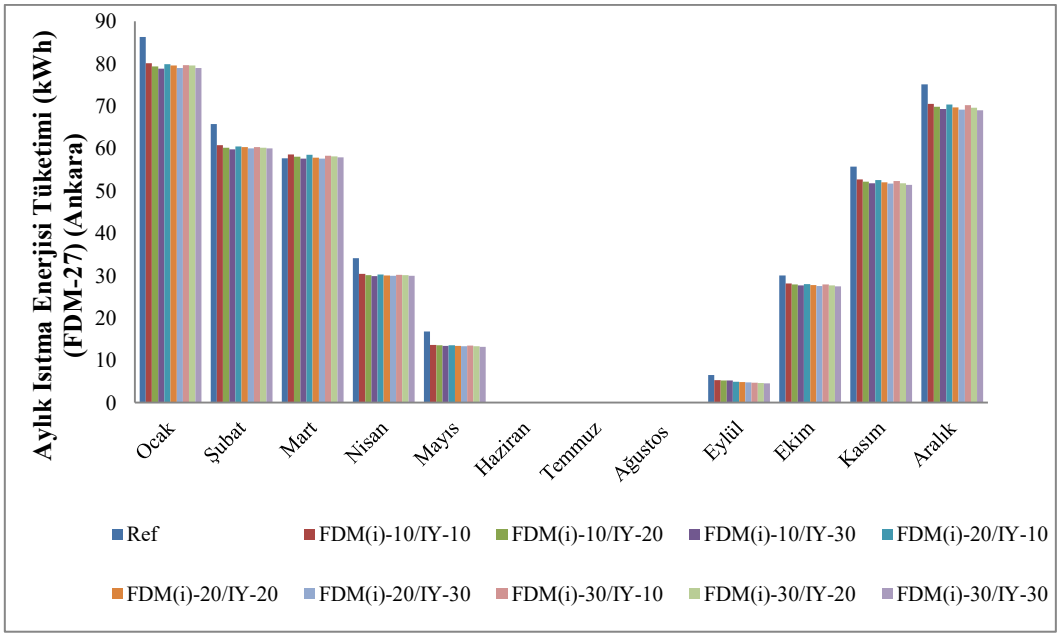
Şekil 5.81. İstanbul'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi

- Ankara'da referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi:

Referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların Ankara'da kış dönemi için yıllık toplam ısıtma enerjisi tüketimi Şekil 5.82. ve Şekil 5.83.'te verilmiştir.



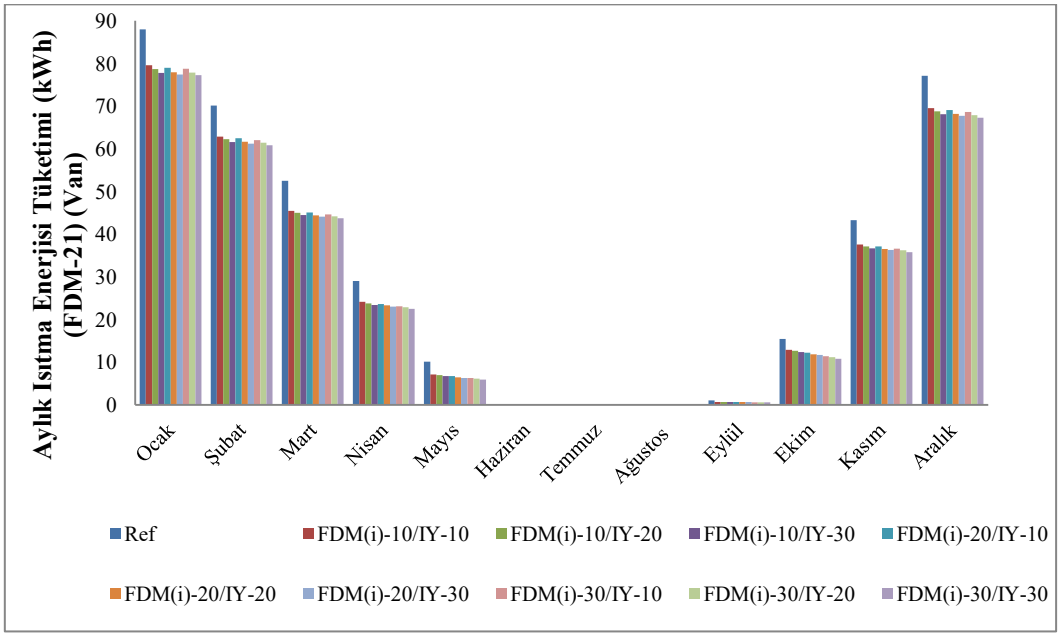
Şekil 5.82. Ankara'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi



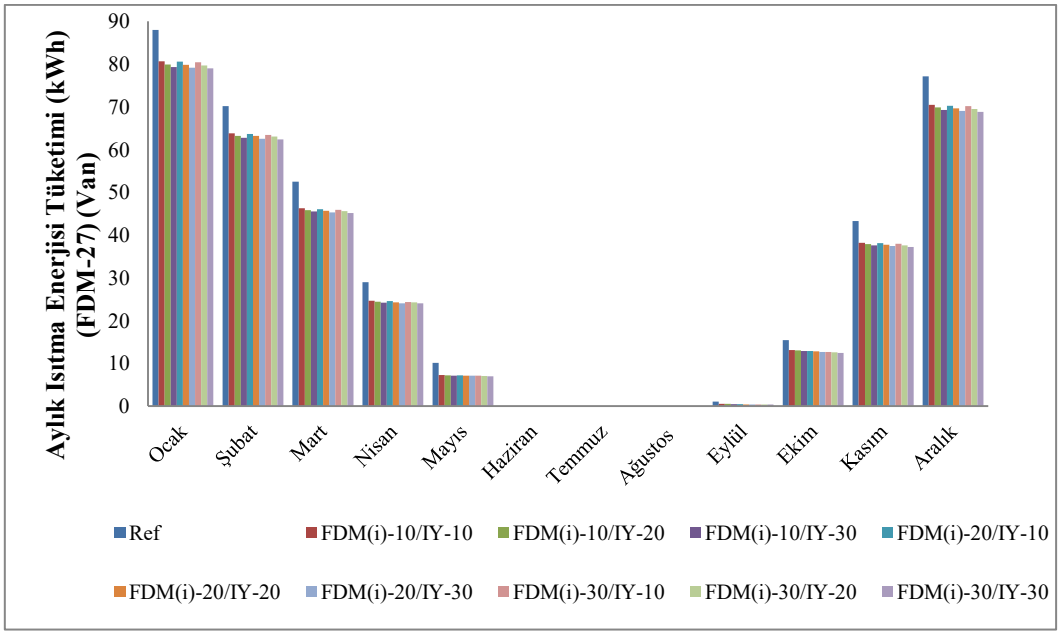
Şekil 5.83. Ankara'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi

- Van'da referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi:

Referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların Van'da kış dönemi için yıllık toplam ısıtma enerjisi tüketimi Şekil 5.84. ve Şekil 5.85.'te verilmiştir.



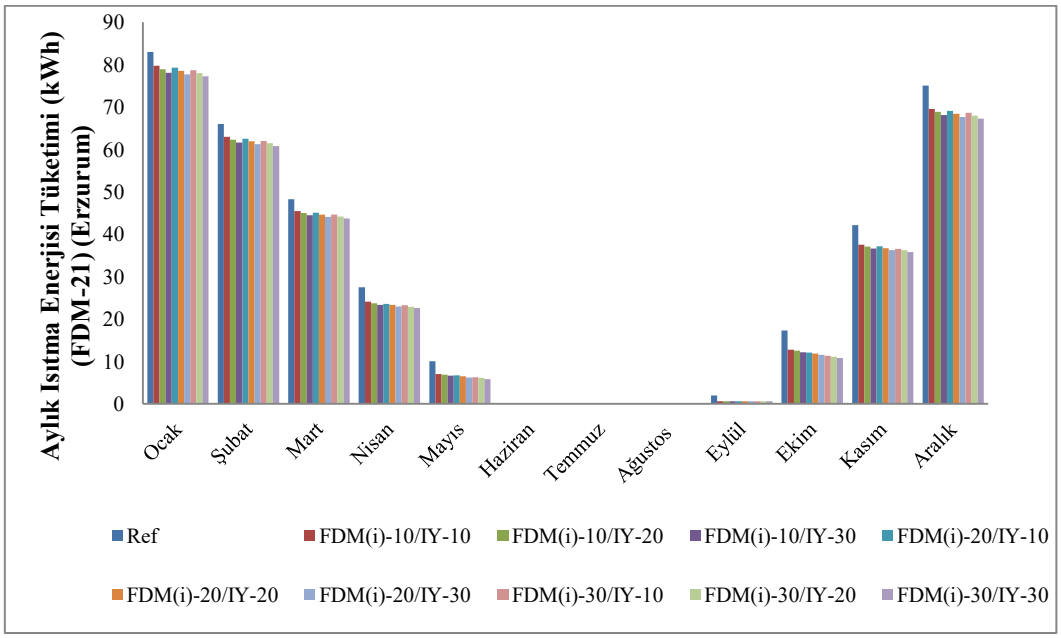
Şekil 5.84. Van'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi



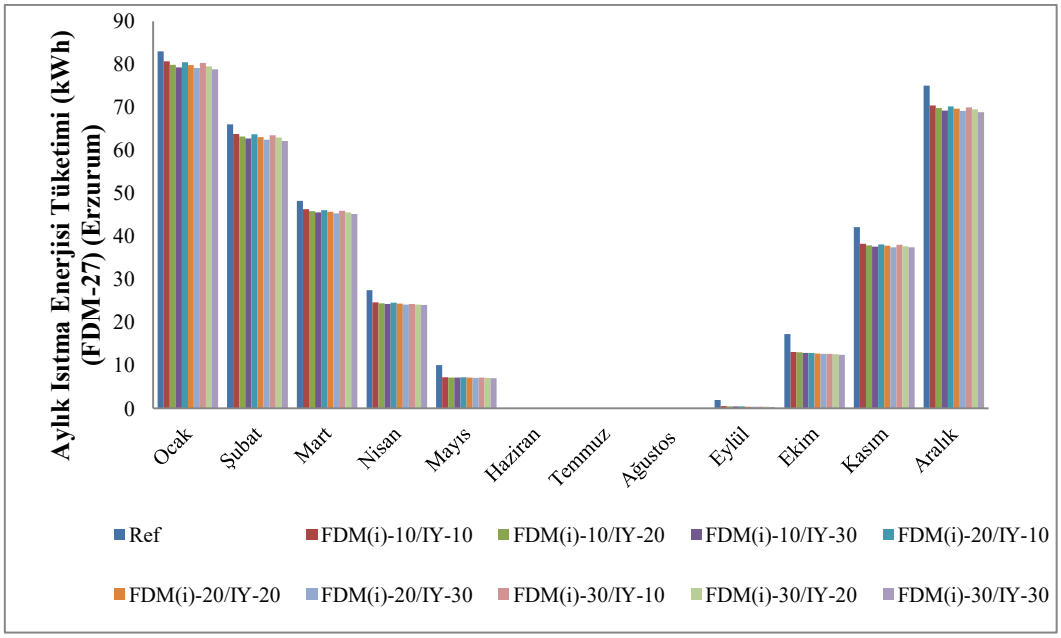
Şekil 5.85. Van'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi

- Erzurum'da referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi:

Referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların Erzurum'da kış dönemi için yıllık toplam ısıtma enerjisi tüketimi Şekil 5.86. ve Şekil 5.87.'de verilmiştir.



Şekil 5.86. Erzurum'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi



Şekil 5.87. Erzurum'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların toplam ısıtma enerjisi tüketimi

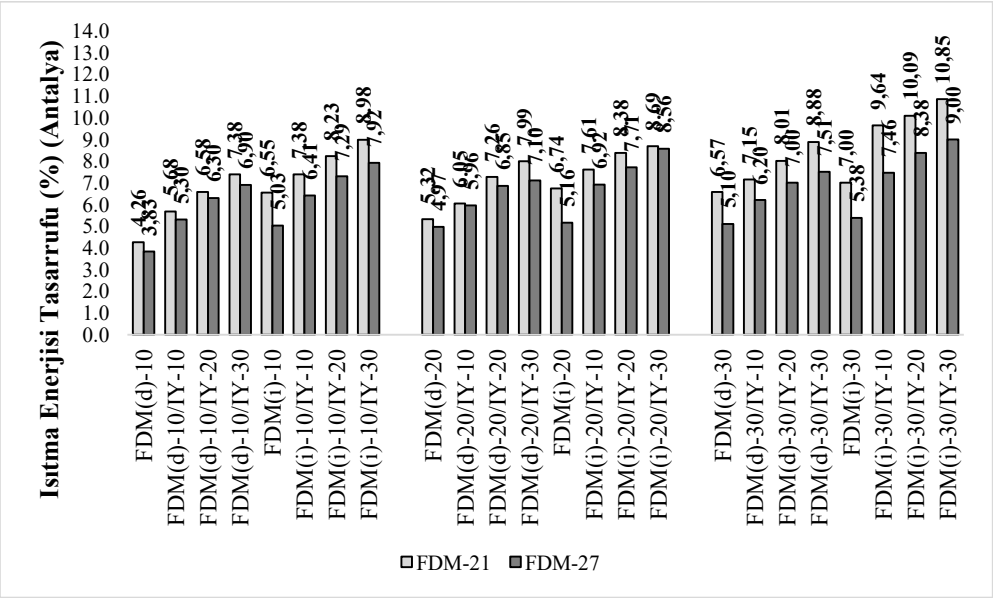
Kış döneminde Antalya'da referans binanın yıllık toplam ısıtma enerjisi tüketimi 125,60 kWh'tir. FDM(i)/IY entegrasyonu ile bu enerji tüketimi 109,97 kWh'e kadar azalmıştır (Şekil 5.78.; Şekil 5.79.). İstanbul'da referans binanın yıllık toplam ısıtma enerjisi tüketimi 303,46 kWh'tir. FDM(i)/IY entegrasyonu ile bu enerji tüketimi 272,11 kWh'e kadar azalmıştır (Şekil 5.80.; Şekil 5.81.). Erzurum'da yıllık toplam ısıtma enerjisi tüketimi 354,35 kWh'tir. FDM(i)/IY kullanımı ile 307,61 kWh'e kadar azalmıştır (Şekil 5.86.; Şekil 5.87.). Van'da yıllık toplam ısıtma enerjisi gereksinimi 386,58 kWh olup, FDM(i)/IY kullanımı ile 335,32 kWh'e kadar azalmıştır (Şekil 5.84.; Şekil 5.85.). Yıllık toplam ısıtma enerjisi gereksinimi en yüksek olan il Ankara'dır (433,98 kWh). FDM(i)/IY entegrasyonu ile bu enerji tüketimi 376,74 kWh'e kadar azalmıştır (Şekil 5.82.; Şekil 5.83.). Bu bulgulardan yola çıkılarak duvar kesitlerine FDM ve IY'nı birlikte entegre etmenin kış döneminde ısıtma enerjisinden tasarruf bakımından olumlu sonuçlar verdiği ifade edilebilmektedir.

- Referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların ısıtma enerjisi tasarrufu oranı üzerindeki etkileri:

FDM/IY entegre edilmiş eğitim binalarında FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının ısıtma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri sırasıyla Şekil

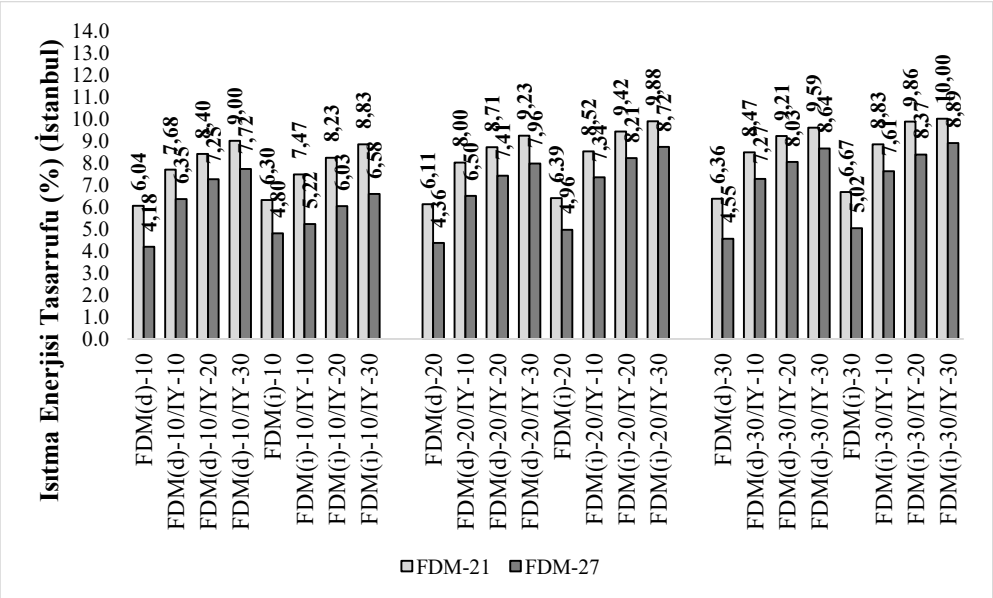
5.88., Şekil 5.89., Şekil 5.90., Şekil 5.91. ve Şekil 5.92.'de verilmiştir.

21 ºC erime sıcaklığına sahip yalnızca FDM(i) Antalya'da %6,55 tasarruf sağlarken, dış bölgeden IY eklendiğinde %8,98'e kadar tasarruf elde edilmiştir (Şekil 5.88.).



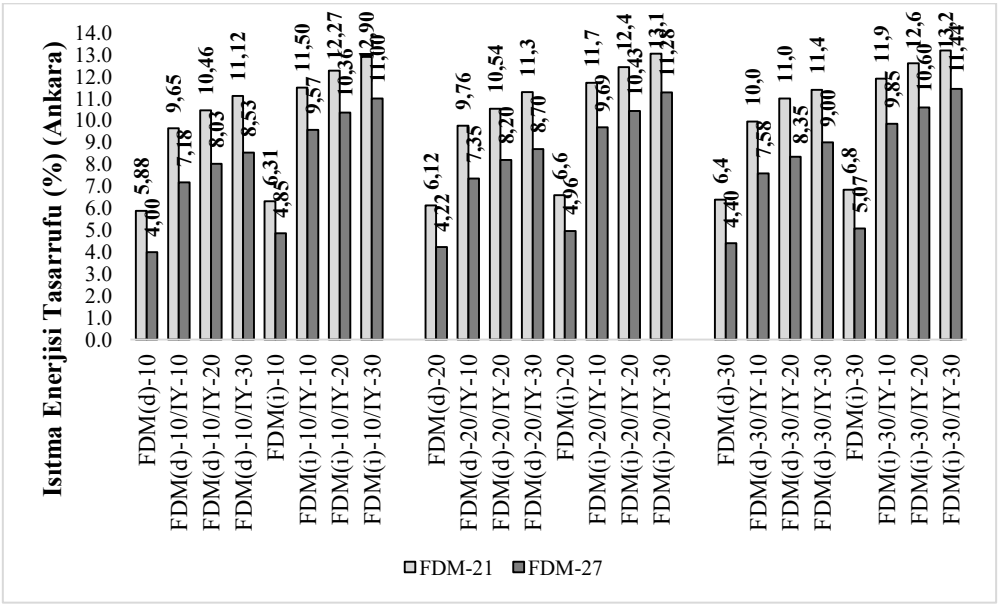
Şekil 5.88. Antalya'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının ısıtma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri

21 ºC erime sıcaklığına sahip yalnızca FDM(i) İstanbul'da %6,30 tasarruf sağlarken, dış bölgeden IY eklendiğinde %8,83'e kadar tasarruf elde edilmiştir (Şekil 5.89.).



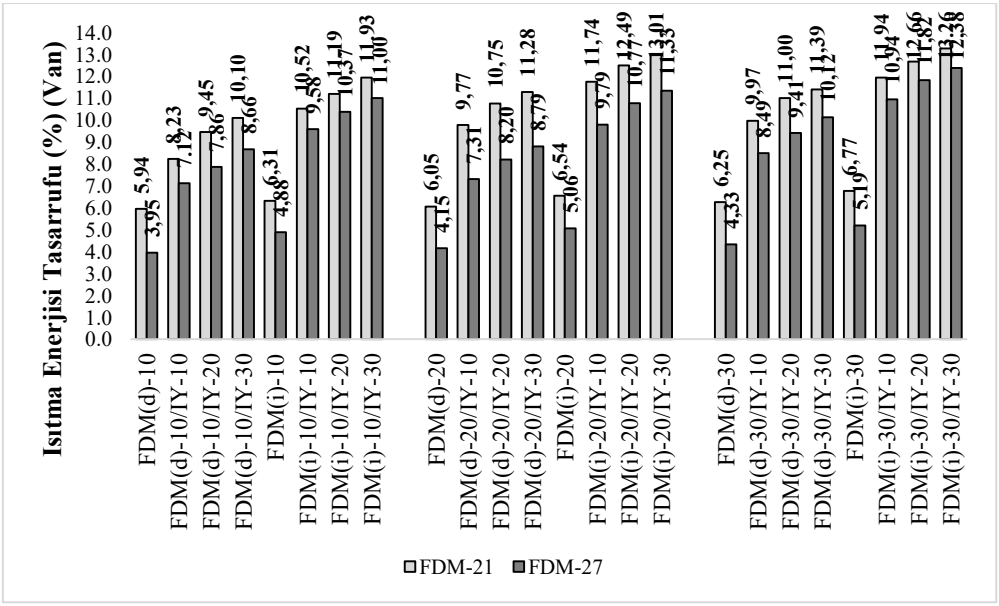
Şekil 5.89. İstanbul'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının ısıtma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri

21 ºC erime sıcaklığına sahip yalnızca FDM(i) Ankara'da %6,31 tasarruf sağlarken, dış bölgeden IY eklendiğinde %12,90'a kadar tasarruf elde edilmiştir (Şekil 5.90.).



Şekil 5.90. Ankara'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının ısıtma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri

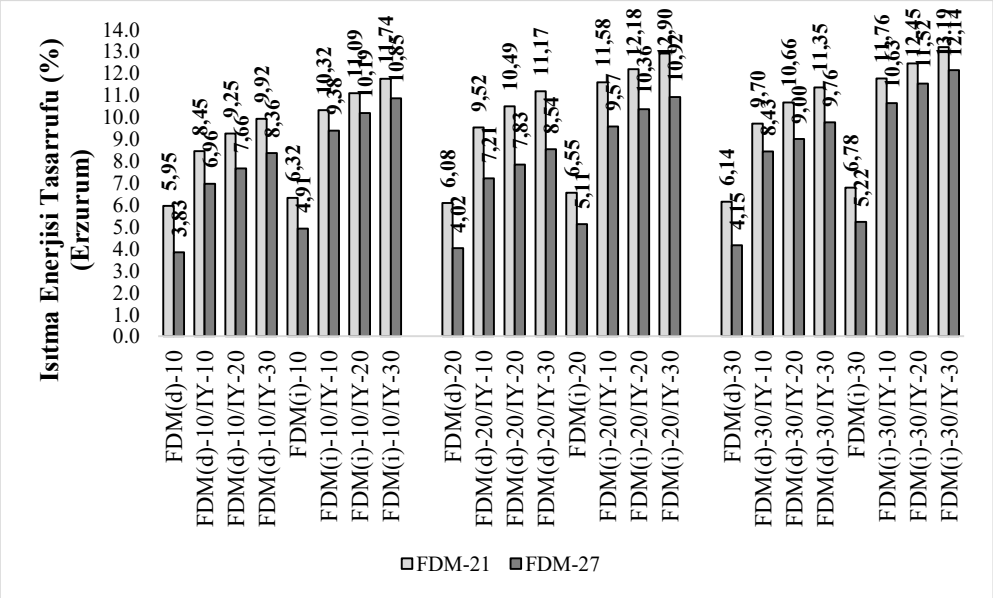
21 ºC erime sıcaklığına sahip yalnızca FDM(i) Van'da %6,31 tasarruf sağlarken, dış bölgeden IY eklendiğinde %11,93'e kadar tasarruf elde edilmiştir (Şekil 5.91.).



Şekil 5.91. Van'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının ısıtma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri

21 ºC erime sıcaklığına sahip yalnızca FDM(i) Erzurum'da %6,32 tasarruf sağlarken,

dış bölgeden IY eklendiğinde %11,74'e kadar tasarruf elde edilmiştir (Şekil 5.92.).



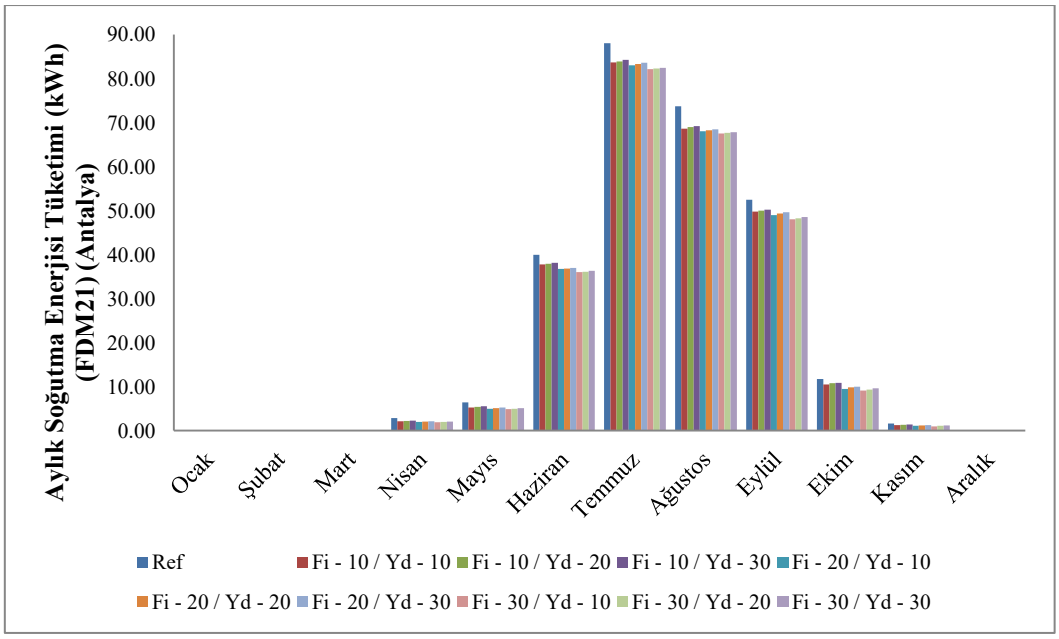
Şekil 5.92. Erzurum'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının ısıtma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri

Kış döneminde, FDM(i)/IY içeren duvar kesitlerinin referans duvara nazaran ısı enerjisi tüketimi arasındaki fark Antalya (15,63 kWh) ve İstanbul'da (31,35 kWh) nispeten düşük olmasına rağmen, Van (51,26 kWh), Erzurum (56,74 kWh) ve Ankara'da (57,24 kWh) daha yüksektir. Bu durum, bölgelerin gece ve gündüz arasındaki sıcaklık farkından (Şekil 4.1.) kaynaklanabilmektedir. Van, Erzurum ve Ankara gibi günlük sıcaklık farkının daha fazla olduğu bölgelerde FDM'nin iç bölgede yer alması enerji tüketim miktarını daha etkili bir şekilde azaltmaktadır. Bu bulgu, FDM'nin termal kütle etkisinin, gündüz ve gece sıcaklıkları arasındaki farkın belirgin olduğu kara iklimi özellikleri taşıyan bölgelerde daha etkin şekilde devreye girdiğini göstermektedir.

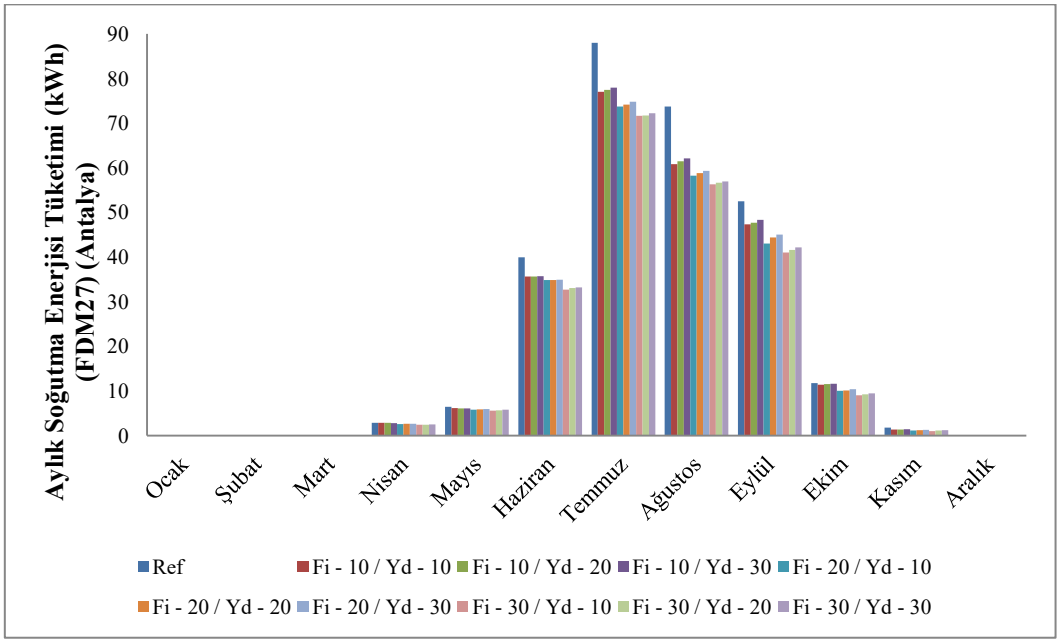
En yüksek enerji tasarruf oranı iç bölgede 30 mm FDM-21 ve dış bölgede 30 mm IY içeren (FDM(i)-30/IY-30) kesitten elde edilmiş olup değerler şöyledir: Antalya'da %10,85, İstanbul'da %10,00, Ankara'da %13,19, Van'da %13,26 ve Erzurum'da %13,19'dur. Bu değerler yalnızca 30 mm FDM-21 içeren duvar kesitlerinin ısıtma enerjisi tasarruf oranları (Bölüm 5.1.2.) (Antalya %7, İstanbul %6,67, Ankara %6,84, Van %6,77 ve Erzurum %6,78) ile kıyaslandığında, yapı kabuğuna IY entegre edilmesiyle 1,55-1,98 kat daha yüksek oranda enerji tasarrufu elde edilmektedir.

- Antalya'da referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi:

Referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların Antalya'da yaz dönemi için yıllık toplam soğutma enerjisi tüketimi Şekil 5.93. ve Şekil 5.94.'te verilmiştir.



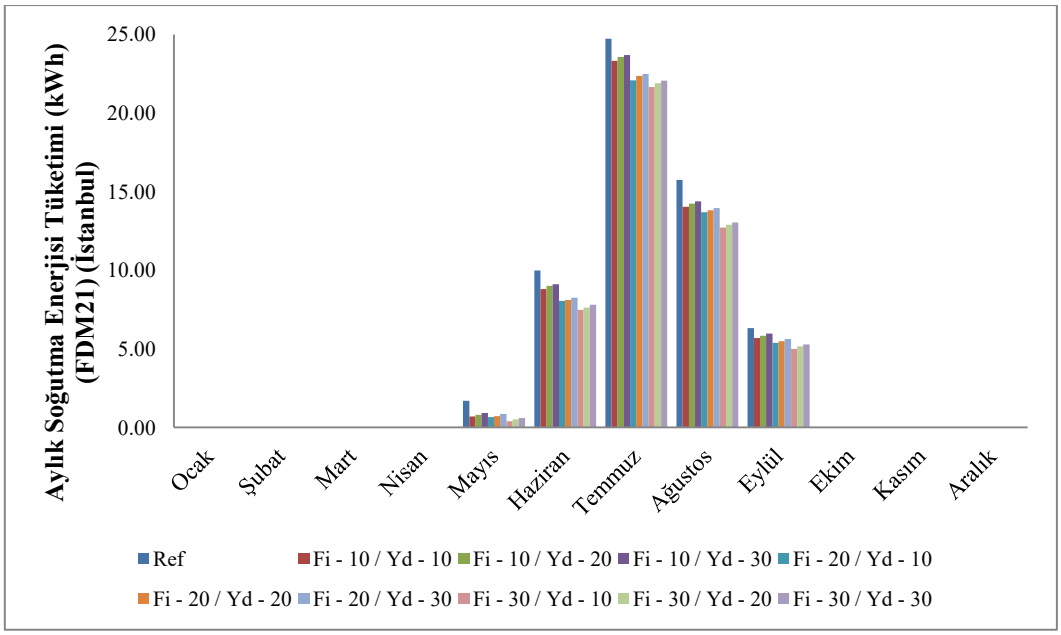
Şekil 5.93. Antalya'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi



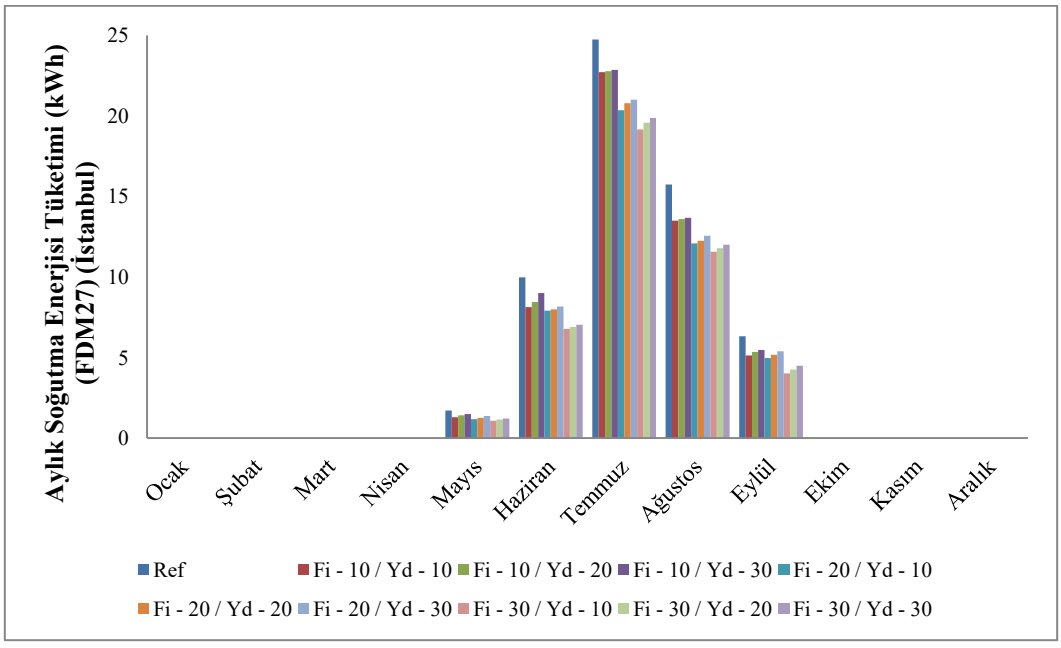
Şekil 5.94. Antalya'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi

- İstanbul'da referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi:

Referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların İstanbul'da yaz dönemi için yıllık toplam soğutma enerjisi tüketimi Şekil 5.95. ve Şekil 5.96.'da verilmiştir.



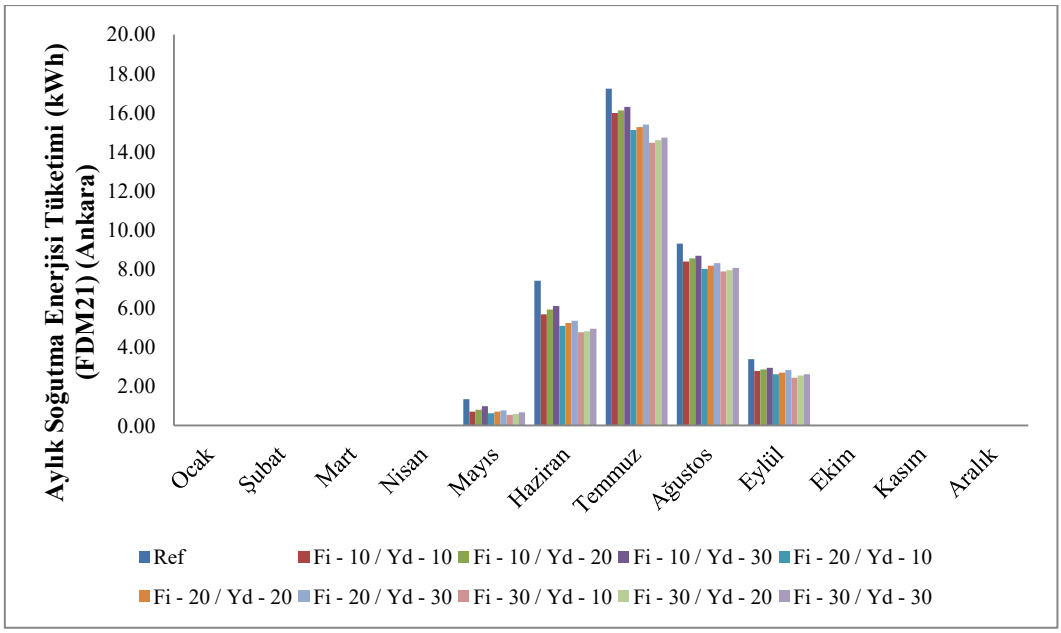
Şekil 5.95. İstanbul'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi



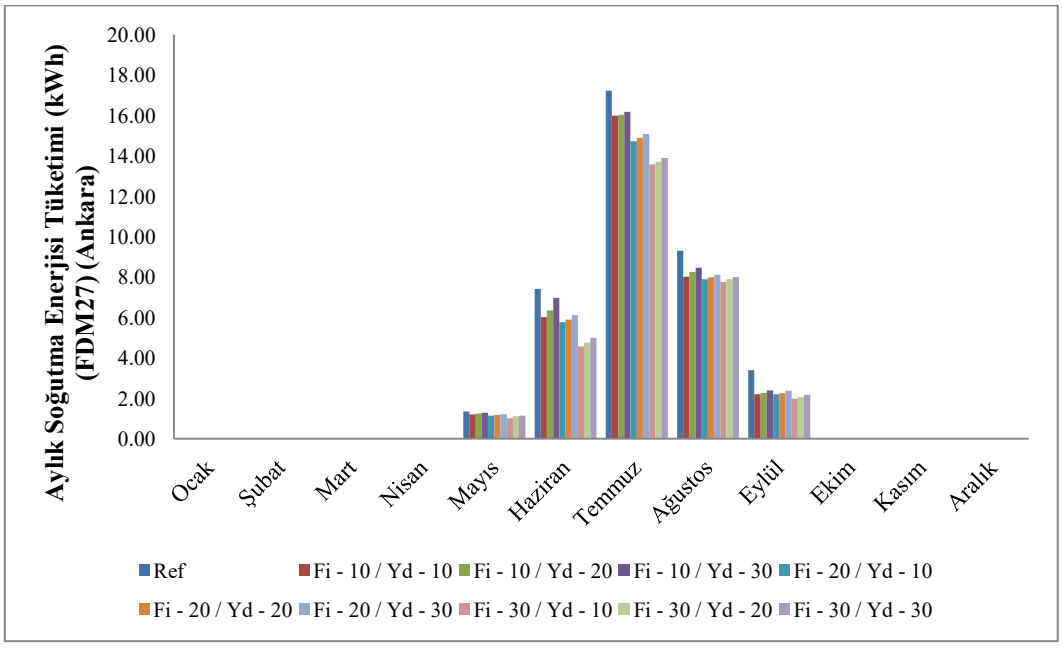
Şekil 5.96. İstanbul'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi

- Ankara'da referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi:

Referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların Ankara'da yaz dönemi için yıllık toplam soğutma enerjisi tüketimi Şekil 5.97. ve Şekil 5.98.'de verilmiştir.



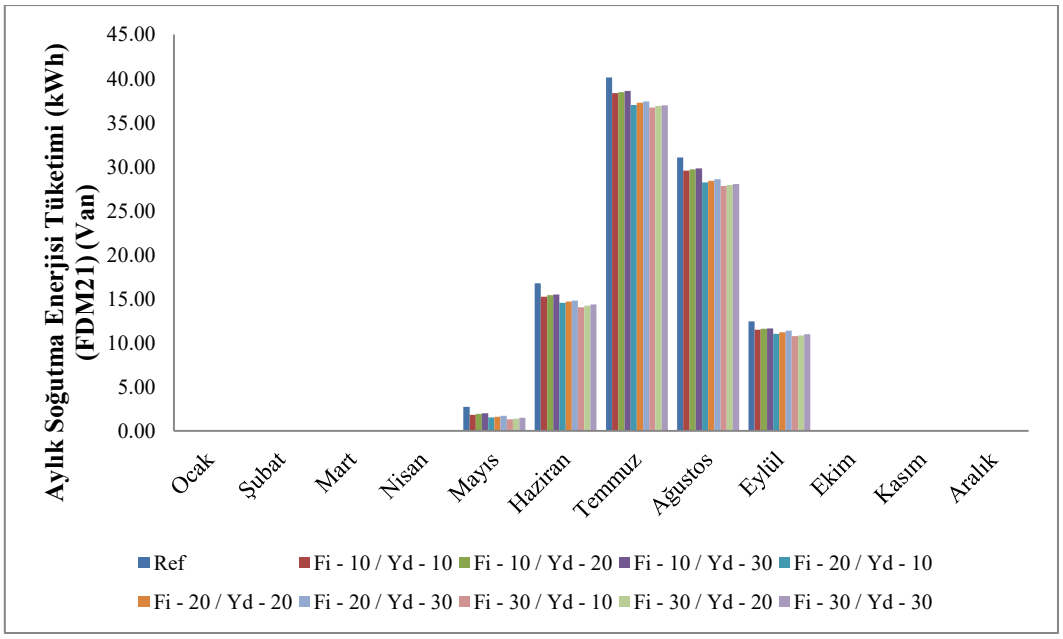
Şekil 5.97. Ankara'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi



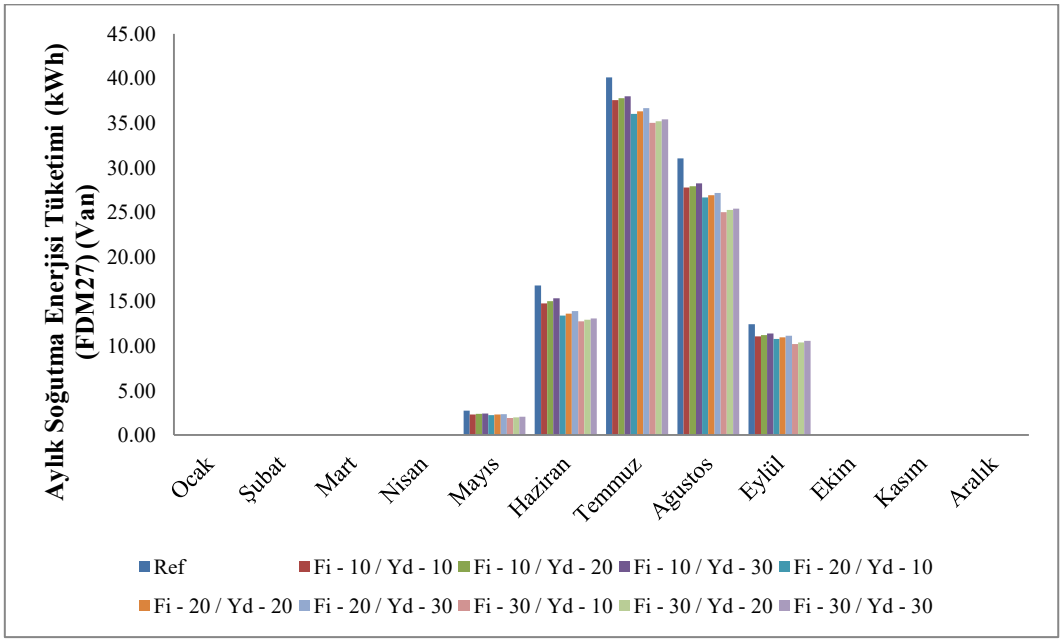
Şekil 5.98. Ankara'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi

- Van'da referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi:

Referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların Van'da yaz dönemi için yıllık toplam soğutma enerjisi tüketimi Şekil 5.99. ve Şekil 5.100.'de verilmiştir.



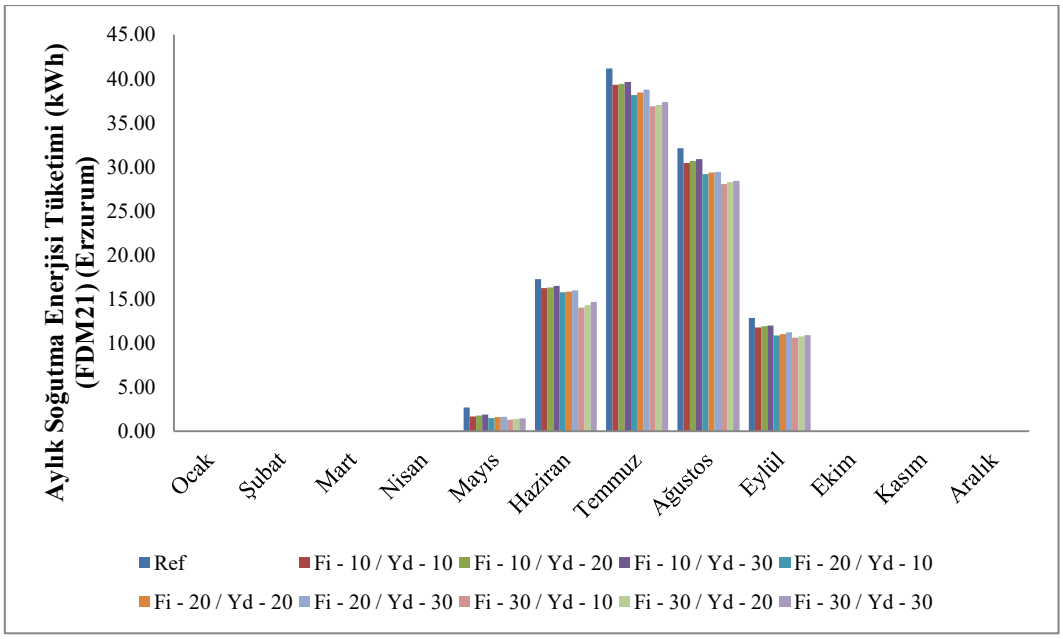
Şekil 5.99. Van'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi



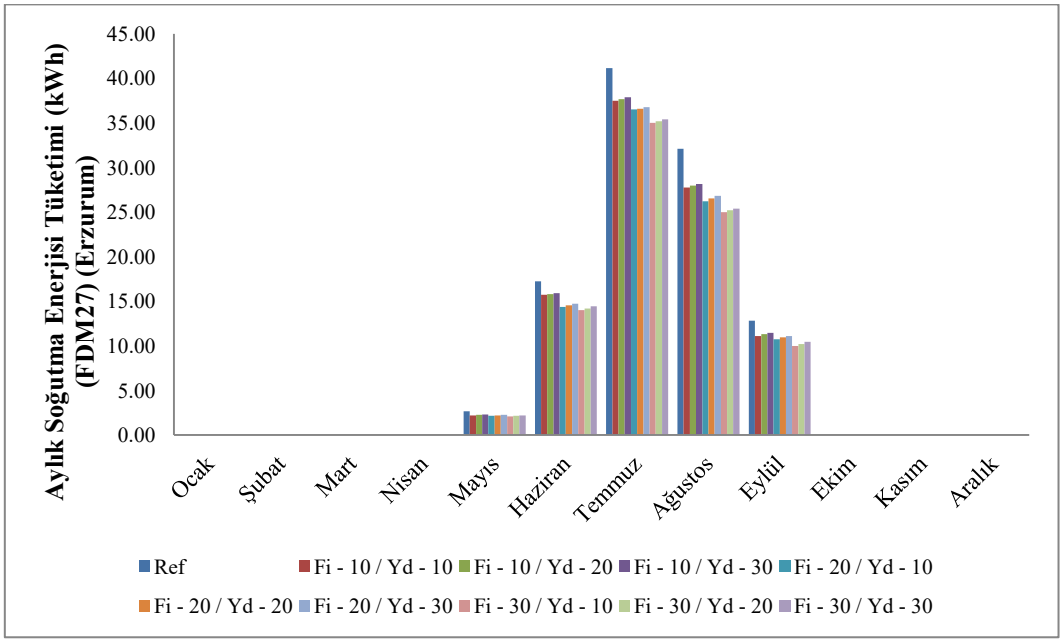
Şekil 5.100. Van'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi

- Erzurum'da referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi:

Referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların Erzurum'da yaz dönemi için yıllık toplam soğutma enerjisi tüketimi Şekil 5.101. ve Şekil 5.102.'de verilmiştir.



Şekil 5.101. Erzurum'da referans, FDM-21 ve IY entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi



Şekil 5.102. Erzurum'da referans, FDM-27 ve IY entegre edilmiş binaların toplam soğutma enerjisi tüketimi

Yaz döneminde yıllık toplam soğutma enerjisi gereksinimi en yüksek olan il Antalya'dır. Antalya'da yaz döneminde referans binanın yıllık toplam soğutma enerjisi tüketimi 284,43 kWh'tir. FDM(i)/IY entegrasyonu ile bu enerji tüketimi 219,51 kWh'e kadar azalmıştır (Şekil 5.93.; Şekil 5.94.). İkinci derece iklim bölgesinde yer alan İstanbul'da yıllık toplam soğutma enerjisi gereksinimi 58,62 kWh olup, FDM(i)/IY kullanımı ile 42,60 kWh'e kadar azalmıştır (Şekil 5.95.; Şekil 5.96.). Yıllık toplam soğutma enerjisi gereksinimi en düşük olan Ankara'da referans binanın yıllık toplam soğutma enerjisi tüketimi 39,11 kWh'tir ve 28,89 kWh'e kadar azalmıştır (Şekil 5.97.; Şekil 5.98.). Van ve Erzurum benzer sonuçlar vermiştir ve yıllık toplam soğutma enerjisi gereksinimleri sırasıyla 110,45 kWh ve 111,63 kWh'tir. Bu enerji tüketimleri sırasıyla 84,84 kWh (Şekil 5.99.; Şekil 5.100.) ve 86,10 kWh'e (Şekil 5.101.; Şekil 5.102.) kadar azalmıştır. İstanbul ve Ankara'ya nazaran daha soğuk iklim özellikleri gösteren Van ve Erzurum'da daha yüksek yıllık toplam soğutma enerjisi tüketimi olmasının nedenleri Bölüm 5.1.2.'de açıklanmıştır.

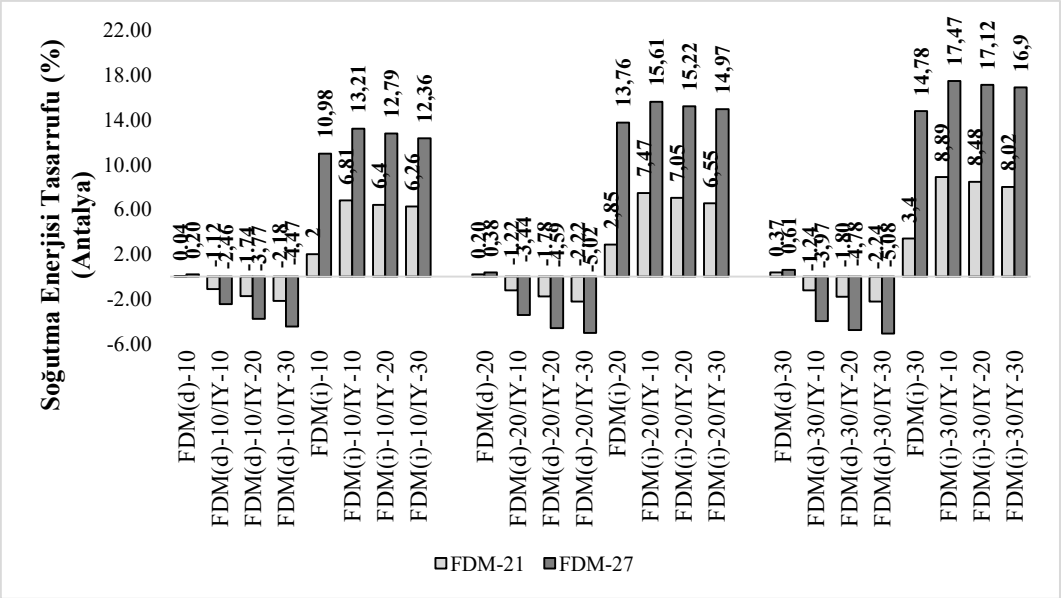
Elde edilen veriler ışığında farklı iklim bölgelerinde FDM(i)/IY kullanımının soğutma yüklerini azaltma potansiyelinin bölgesel iklim koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği ortaya konulmaktadır. Bu bulgulardan yola çıkılarak duvar kesitlerine FDM ve IY'nı birlikte entegre etmenin yaz döneminde soğutma enerjisinden tasarruf bakımından olumlu sonuçlar verdiği ifade edilebilmektedir.

- Referans, FDM ve IY entegre edilmiş binaların soğutma enerjisi tasarrufu oranı üzerindeki etkileri:

FDM/IY entegre edilmiş eğitim binalarında FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının soğutma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri sırasıyla Şekil 5.103., Şekil 5.104., Şekil 5.105., Şekil 5.106. ve Şekil 5.107.'de verilmiştir.

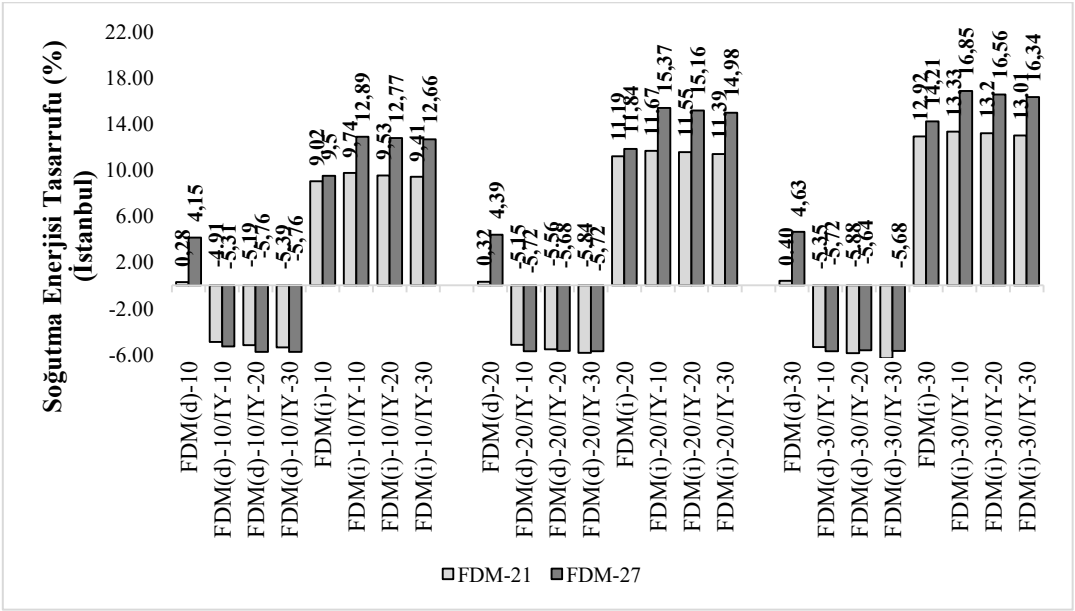
Yaz döneminde FDM ve IY en dış katmanlara yerleştirildiğinde (FDM(d)/IY, Tablo 4.2.(e)), soğutma enerjisi tasarruf oranlarının negatif yönde değiştiği gözlemlenmiştir.

21 ºC erime sıcaklığına sahip yalnızca FDM(i) Antalya'da %2 tasarruf sağlarken, dış bölgeden IY eklendiğinde %6,26'ya kadar tasarruf elde edilmiştir (Şekil 5.103.).



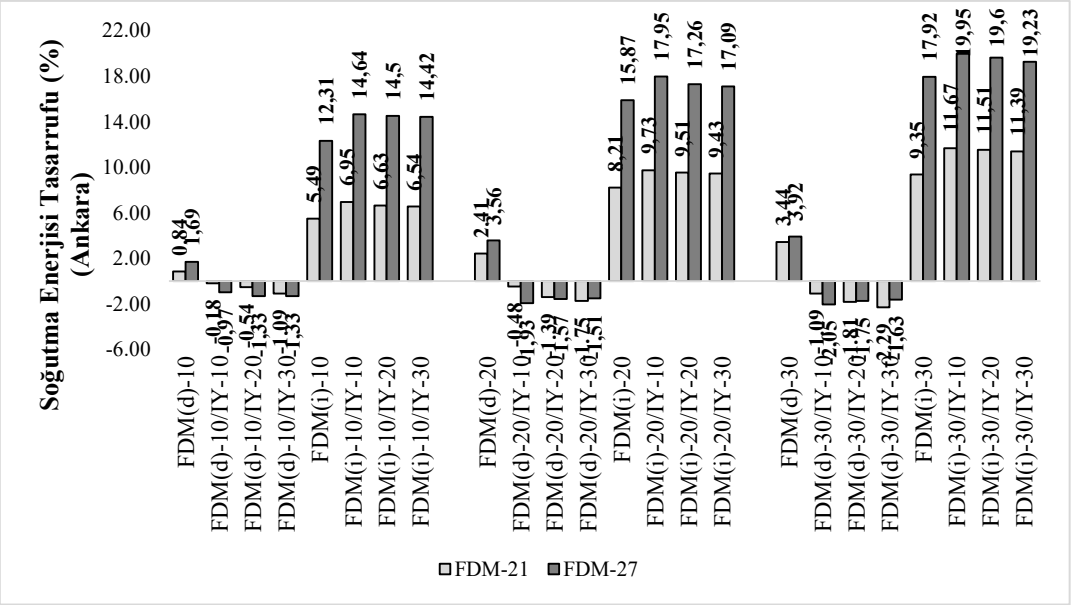
Şekil 5.103. Antalya'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının soğutma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri

21 ºC erime sıcaklığına sahip yalnızca FDM(i) İstanbul'da %9,02 tasarruf sağlarken, dış bölgeden IY eklendiğinde %9,41'e kadar tasarruf elde edilmiştir (Şekil 5.104.).



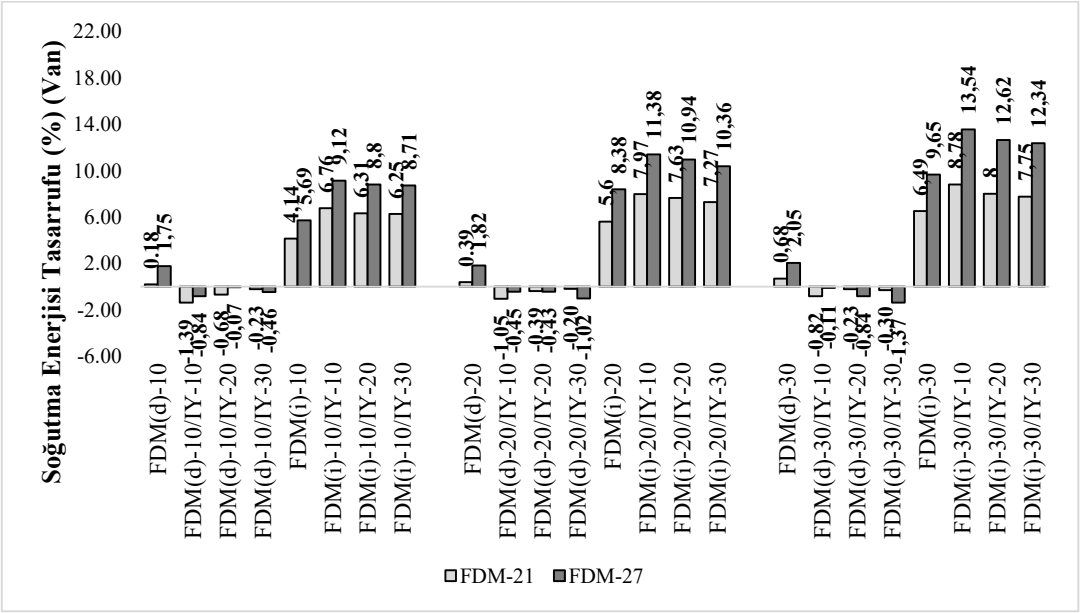
Şekil 5.104. İstanbul'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının soğutma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri

21 ºC erime sıcaklığına sahip yalnızca FDM(i) Ankara'da %5,49 tasarruf sağlarken, dış bölgeden IY eklendiğinde %6,54'e kadar tasarruf elde edilmiştir (Şekil 5.105.).



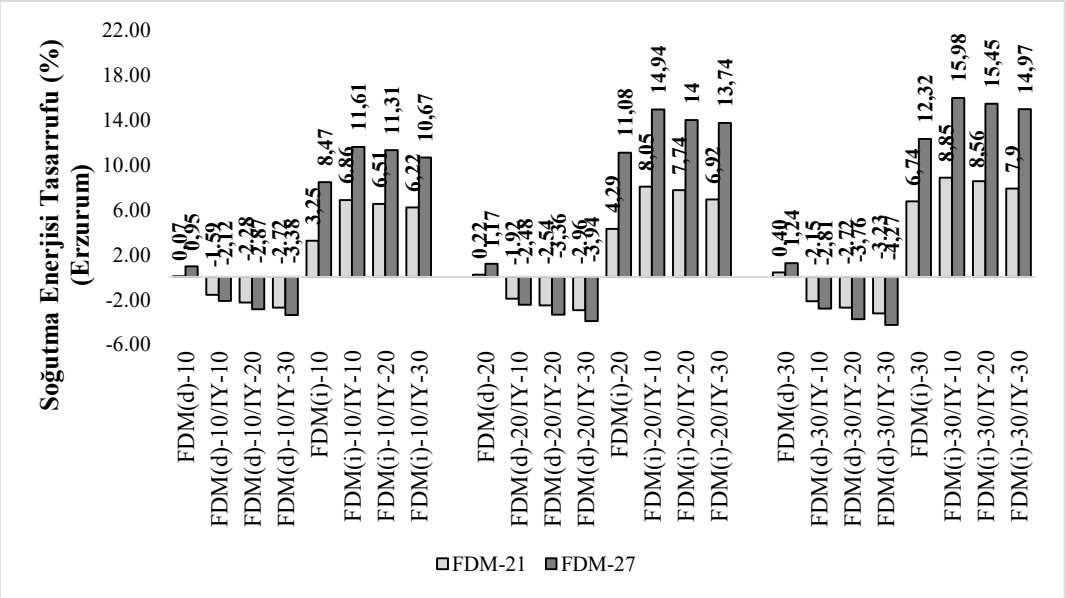
Şekil 5.105. Ankara'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının soğutma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri

21 ºC erime sıcaklığına sahip yalnızca FDM(i) Van'da %4,14 tasarruf sağlarken, dış bölgeden IY eklendiğinde %6,25'e kadar tasarruf elde edilmiştir (Şekil 5.106.).



Şekil 5.106. Van'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının soğutma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri

21 ºC erime sıcaklığına sahip yalnızca FDM(i) Erzurum'da %3,25 tasarruf sağlarken, dış bölgeden IY eklendiğinde %6,22'ye kadar tasarruf elde edilmiştir (Şekil 5.107.).

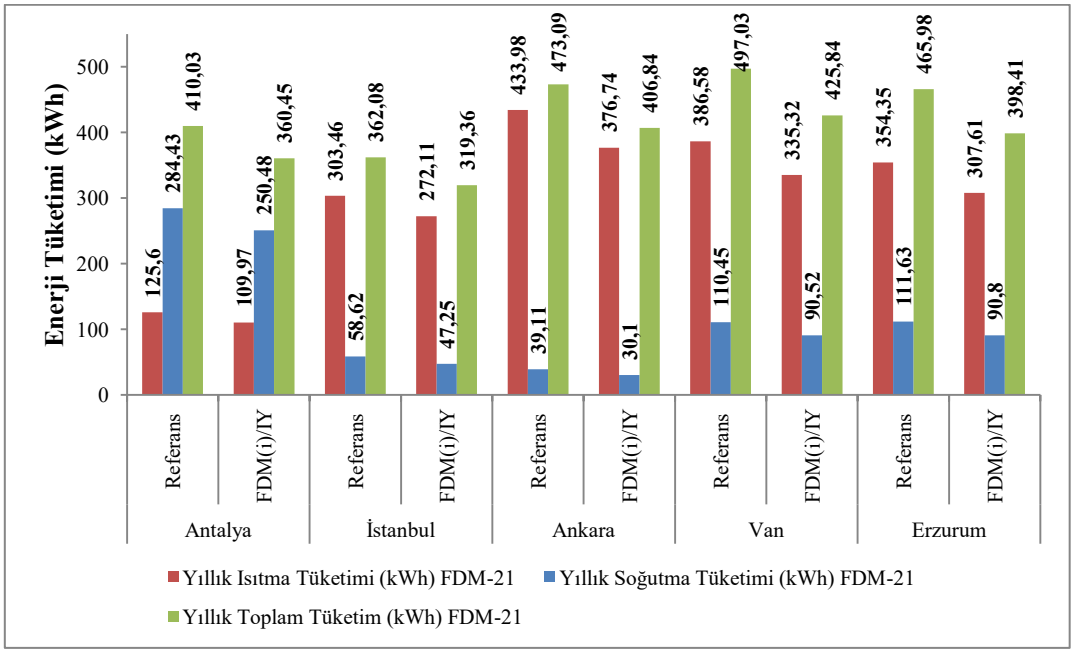


Şekil 5.107. Erzurum'da FDM ve IY konumu ve kalınlığının ve FDM erime sıcaklığının soğutma enerjisi tasarruf oranı üzerindeki etkileri

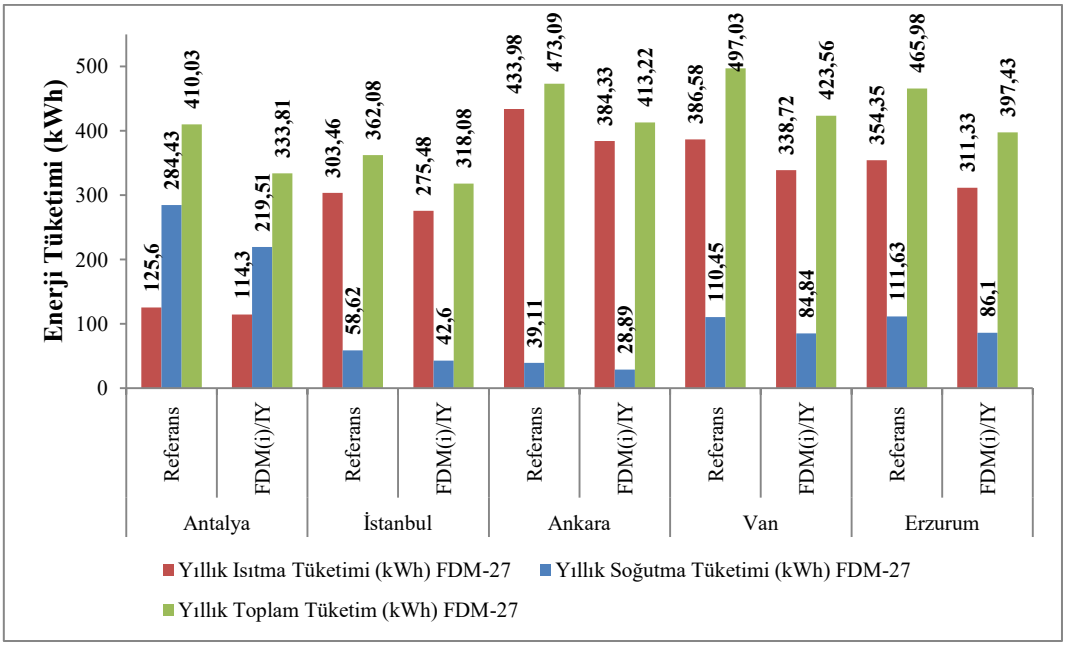
Yaz döneminde IY kalınlığı her iki erime sıcaklığında da sabit tutulduğunda, FDM kalınlığının artırılması enerji tasarruf oranını kademeli olarak artırmıştır. Ancak, FDM kalınlığı sabit tutulduğunda, IY kalınlığının artırılması enerji tasarruf oranını kademeli olarak azaltmıştır. Örneğin, Ankara'da FDM-21 kalınlığı 30 mm olarak sabit tutulduğunda, 10 mm IY (FDM(i)-30/IY-10) %11,67 oranında yıllık enerji tasarrufu sağlamıştır. IY kalınlığı 20 ve 30 mm'ye çıkarıldığında bu oran sırasıyla %11,51 ve %11,39'a düşmüştür. Ayrıca, FDM-21 yerine FDM-27 kullanıldığında, FDM(i)-30/IY-10 %19,95 enerji tasarrufu sağlamıştır. Ancak, IY kalınlığının 20 ve 30 mm'ye çıkarılmasıyla bu oran sırasıyla %19,60 ve %19,23'e düşmüştür. Bu sonucun nedeni, daha kalın IY'nin gündüz saatlerinde biriken ısının salınımını geciktirmesi ve bu durumun iç ortam sıcaklığını artırmasıdır. Bu durumda, iç ortamı soğutmak için HVAC sistemi daha fazla çalışmış ve FDM-IY kullanımından elde edilen enerji tasarrufu, IY kalınlığı arttıkça azalmıştır. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için IY'nin duvarın en iç katmanına entegre edilmesi önerilebilir. (Al-Yasiri ve Szabo, 2023), IY'nin en iç katmanda kalın bir şekilde kullanılmasının yaz aylarında daha yüksek enerji tasarrufu sağladığını belirlemiştir. Ancak, IY'nin en iç katmanda kullanılması özellikle kış aylarında yoğuşma gibi bina malzemelerine daha ciddi zararlar verebileceğinden, bu çalışmada IY yalnızca en dış katmanda kullanılmıştır.

Kış döneminde bütün iklim bölgelerinde FDM-21/IY içeren duvar kesitleri FDM-27/IY

içeren kesitlere nazaran daha yüksek oranda ısıtma enerjisi tasarrufu sağlamıştır. Bu bulgunun nedeni, FDM-21'in kışın güneşli saatlerde daha kolay eriyebilecek kadar düşük erime sıcaklığına sahip olması ve böylece daha yüksek miktarda enerji depolayabilmesidir. Geceleri ortam sıcaklığı azaldığında FDM-21 depolamış oldugu enerjiyi ortama geri vererek HVAC sistemine olan ihtiyacın azalmasına FDM-27'ye nazaran daha fazla katkı sağlamaktadır. Yaz döneminde durum tam tersidir. Bütün iklim bölgelerinde FDM-27/IY içeren duvar kesitleri FDM-21/IY içeren kesitlere nazaran daha yüksek oranda soğutma enerjisi tasarrufu sağlamıştır. En iç katmanda 30 mm FDM-27 ve en dış katmanda 10 mm IY (FDM(i)-30/IY-10) bulunan ve ideal duvar katmanlaşması olarak belirlenen binalar, Antalya'da %17,47, İstanbul'da %16,85, Ankara'da %19,95, Van'da %13,54 ve Erzurum'da %15,98 oranında enerji tasarrufu sağlamıştır. Bu değerler, yalnızca FDM içeren duvar kesitlerindeki değerlerden 1,11-1,40 kat daha yüksektir (Bölüm 5.1.2.). Bu bulgular doğrultusunda, FDM'nin en iç katmanda ve IY'nin en dış katmanda birlikte kullanılmasının yıllık ısıtma ve soğutma enerjisi tasarrufu açısından avantajlı olduğu belirlenmiştir. Referans ve ideal performans gösteren FDM-IY duvar kesitlerinin yıllık toplam ısıtma-soğutma enerjisi ve toplam enerji tüketimi değerleri Şekil 5.108. ve Şekil 5.109.'da verilmiştir. Bu karşılaştırmada, FDM kalınlığı olarak ideal 30 mm sabit tutulmuştur.



Şekil 5.108. Referans ve ideal performans gösteren FDM-21 ve IY duvar kesitlerinin yıllık toplam ısıtma-soğutma enerjisi ve toplam enerji tüketimi değerleri



Şekil 5.109. Referans ve ideal performans gösteren FDM-27 ve IY duvar kesitlerinin yıllık toplam ısıtma-soğutma enerjisi ve toplam enerji tüketimi değerleri

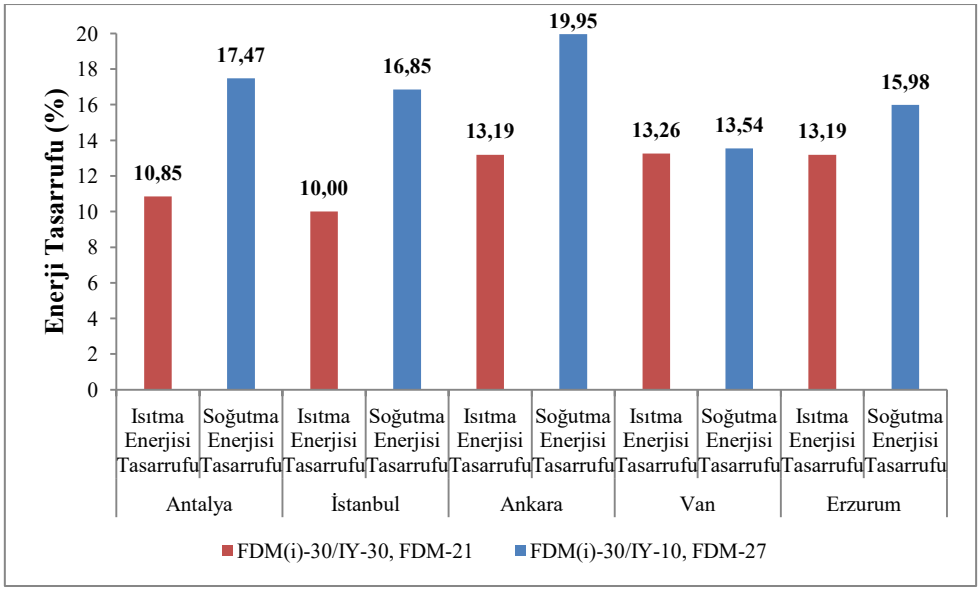
Şekil 5.108. ve Şekil 5.109'a göre FDM-21 ve FDM-27 ile tüm bölgelerde referans duvara nazaran enerji tüketiminin azaldığı gözlemlenmiştir. FDM(i)/IY kombinasyonuna sahip duvar kesitleri, FDM'nin iç ortam sıcaklık dalgalanmalarına karşı termal tepkisini daha verimli bir şekilde ortaya koymasına olanak sağlamış ve bu durum enerji tüketiminde daha belirgin bir azalma ile sonuçlanmıştır.

Özellikle kış dönemine ait yıllık ısıtma tüketimi değerlendirildiğinde, FDM(i)/IY'nin FDM(d)/IY'ye kıyasla daha düşük tüketim değerlerine ulaştığı görülmektedir. Örneğin, FDM-21 için Ankara'da referans duvarla karşılaştırıldığında 57,24 kWh daha düşük ısıtma enerjisi tüketimi ölçülürken, bu değer FDM-27 için 53,28 kWh'dir. Bu durum, FDM-21'in daha düşük erime sıcaklığı nedeniyle kış aylarında daha fazla enerji depolayabilmesi ile açıklanabilmektedir.

Yıllık soğutma tüketimi açısından değerlendirildiğinde, yaz dönemlerinde tüm bölgelerde FDM-27'nin FDM-21'ye nazaran daha düşük enerji tüketimi sağladığı belirlenmiştir. . Örneğin, Ankara'da FDM-27 83,43 kWh'lik bir soğutma tüketimi ile FDM-21'ye (93,1 kWh) nazaran daha iyi bir performans sergilemiştir. Bu bulgu, FDM-27'nin daha yüksek erime sıcaklığı sayesinde yazın gün içinde oluşan aşırı ısının emilimini ve gecikmeli salımını daha etkili gerçekleştirebilmesine dayanmaktadır.

Toplam enerji tüketimi bakımından ise tüm bölgelerde en yüksek değer Van'da gözlemlenmiştir. Referans duvar için yıllık toplam enerji tüketimi 497,03 kWh olarak gerçekleşmiştir. Bu enerji tüketimi, Van ilinin uzun ve sert kış koşullarına sahip olması ve yıllık sıcaklık dalgalanmasının diğer bölgelere kıyasla daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle gece-gündüz sıcaklık farklarının belirgin olduğu bu tür iç bölgelerde, FDM tabanlı malzemelerin kullanımı enerji verimliliği açısından daha önemli hale gelmektedir.

Her iki FDM türü için en düşük yıllık toplam tüketim değerleri FDM(i)/IY kombinasyonlarında elde edilmiştir. FDM-27 ile Antalya'da 333,81 kWh, İstanbul'da 318,08 kWh, Ankara'da 413,22 kWh, Van'da 423,56 kWh ve Erzurum'da 397,43 kWh toplam ısıtma-soğutma enerji tüketim değerleri kaydedilmiştir. Bu durum, FDM'nin iç katmana yerleştirilmesi ile termal kütle etkisinin artırıldığı ve IY'nin dış katmanda kullanımıyla hem güneş kazanımları hem de ısı kayıplarının daha kontrollü hale geldiğini göstermektedir. Şekil 5.108 ve Şekil 5.109'daki bu bulgular, yıllık enerji tüketiminde FDM(i)/IY kombinasyonunun, enerji verimliliği açısından en uygun çözüm olduğunu ortaya koymaktadır. İdeal performans gösteren FDM-IY duvar kesitlerinin iklim bölgelerindeki ısıtma ve soğutma enerjisi tasarruf oranları Şekil 5.110'da verilmiştir. Bu karşılaştırmada, ısıtma dönemi için ideal performans gösteren FDM-21; soğutma dönemi için ideal performans gösteren FDM-27 sabit tutulmuştur.



Şekil 5.110. İdeal performans gösteren FDM-IY duvar kesitlerinin iklim bölgelerindeki ısıtma-soğutma enerjisi tasarruf oranları

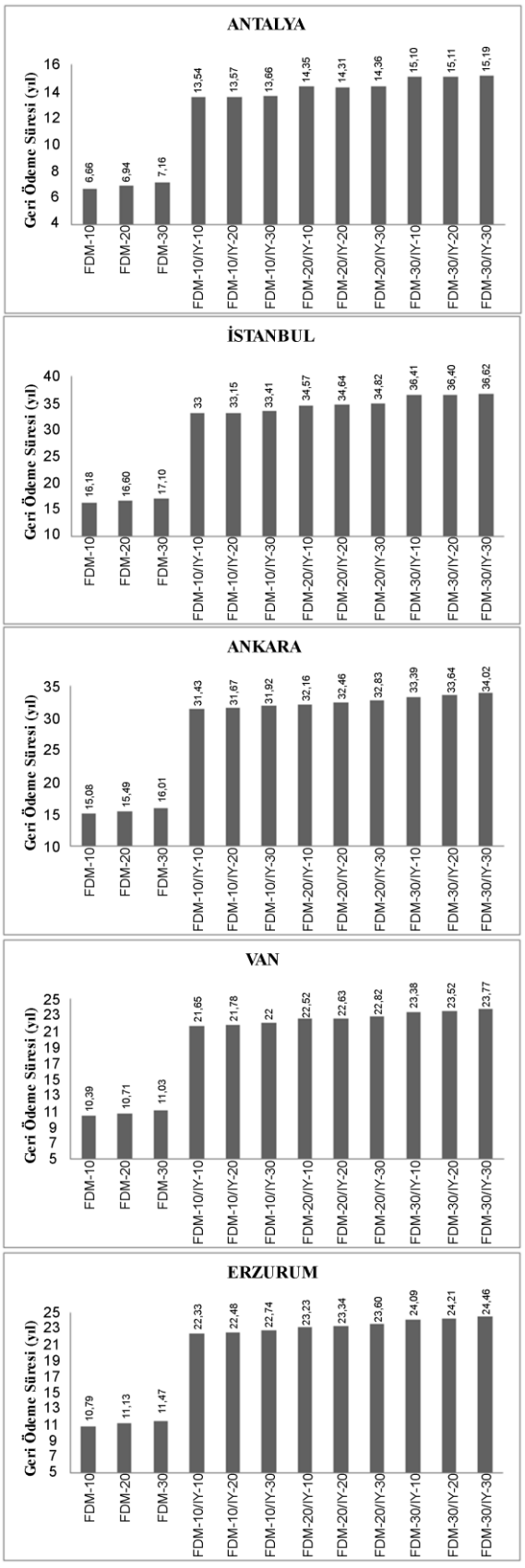
Şekil 5.110.'a göre daha soğuk ve karasal iklim özellikleri taşıyan bölgelerde (Ankara, Van, Erzurum) yaklaşık %13 ısıtma enerjisi tasarruf oranları gözlenmiştir. Öte yandan, daha ılıman ve sıcak iklime sahip bölgelerde (Antalya, İstanbul) ise ısıtma enerjisi tasarrufu %10-11 arasında gerçekleşmiştir. Kış döneminde ideal performans gösteren duvar kesiti (FDM(i)-30/IY-30) ile en yüksek ısıtma enerjisi tasarrufu Van'da (%13,26) hesaplanmıştır. Bu değer diğer bölgelerin ısıtma enerjisi tasarruf oranları (Antalya %10,85, İstanbul %10,00, Ankara %13,19 ve Erzurum %13,19) ile kıyaslandığında, 1,01-1,33 kat daha yüksek oranda enerji tasarrufu sağlamıştır.

Sıcak iklime sahip Antalya'da %17,47 seviyesinde soğutma enerjisi tasarrufu gerçekleşmiştir ve bu oran Van ve Erzurum gibi daha soğuk ve yüksek rakımlı bölgelerde kaydedilen tasarruf oranlarının üzerinde veya yakın seviyededir. Günlük sıcaklık farklarının yüksek olduğu ve yaz döneminde yoğun güneş radyasyonunun etkili olduğu Ankara gibi bölgelerde ise, ideal performans gösteren duvar kesiti (FDM(i)-30/IY-10) ile %19,95 gibi en yüksek soğutma enerjisi tasarruf oranına ulaşılmıştır. Bu değer diğer bölgelerin soğutma enerjisi tasarruf oranları (Antalya %17,47, İstanbul %16,85, Van %13,54 ve Erzurum %15,98) ile kıyaslandığında, 1,14-1,47 kat daha yüksek oranda enerji tasarrufu sağlamıştır.

Kış döneminde, daha soğuk ve karasal iklim özellikleri taşıyan bölgelerde elde edilen yüksek ısıtma enerjisi tasarrufu oranları, FDM-IY kombinasyonunun ısıl kütle etkisinden etkin şekilde yararlanıldığını göstermektedir. Yaz döneminde de soğutma enerjisi tasarrufu oranlarının Van gibi yüksek rakımlı ve daha düşük ortalama sıcaklığa sahip illere nazaran Ankara ve Antalya'da daha yüksek olduğu görülmektedir (Bölüm 5.1.2.). Dolayısıyla, FDM ve IY kombinasyonunun sunduğu tasarruf potansiyeli iklimsel farklılıklara bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu doğrultuda FDM ve IY'nin iklim odaklı olarak tasarlanması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

5.3. Ekonomik Bulgular

Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde yer alan eğitim binalarının yalnızca FDM ve FDM ve IY kombinasyonuna sahip yapı kabuğunun ekonomik etkinliğinin tespitinde EMT ve GÖS gibi önemli ekonomik parametreler hesaplanarak elde edilen değerler Şekil 5.111.'de verilmiştir.



Şekil 5.111. Türkiye'nin iklim bölgelerine göre geri ödeme süreleri

Birinci derece iklim bölgesinde yer alan Antalya, yazları sıcak ve kurak, kışları ise ılıman geçen bir iklim özelliğine sahiptir (İl ve İlçeler İstatistikleri, 2024). Bu iklim özellikleri nedeniyle Antalya'da binalarda soğutma yükü, ısıtma yükünden çok daha belirleyici bir etkendir. Antalya'da sadece FDM kullanıldığında (FDM-10, FDM-20 ve FDM-30), GÖS sırasıyla 6,66 yıl, 6,95 yıl ve 7,17 yıl olarak tespit edilmiştir. En kısa GÖS (6,66 yıl) yalnızca FDM-10 içeren duvara sahip binada elde edilmiştir. Ancak, ekonomik değerlendirme yapılırken ısıl konfor parametrelerinden ödün verilmemelidir. Isıl konfor açısından daha olumlu sonuçlar veren FDM-IY kombinasyonuna sahip duvar kesitlerinin ekonomik etkinliği incelendiğinde, sisteme IY eklendiğinde maliyet artışından dolayı GÖS'ün arttığı gözlemlenmektedir. Örneğin, soğutma dönemi için ideal performans gösteren FDM(i)-30/IY-10 kombinasyonunda GÖS 15,10 yıl ve ısıtma dönemi için ideal performans gösteren FDM(i)-30/IY-30 kombinasyonda ise GÖS 15,20 yıla çıkmaktadır. IY, binaların kış aylarında enerji tüketimini azaltmasına rağmen Antalya'da kış mevsimi kısa ve ılıman geçtiği için bu katkı daha sınırlı düzeyde kalmaktadır.

İstanbul'un ılıman nemli iklim koşulları, binaların hem ısıtma hem de soğutma yüklerine maruz kalmasına neden olmaktadır (İl ve İlçeler İstatistikleri, 2024). Bu nedenle, yapı kabuğunun enerji verimliliğini artırmak amacıyla FDM ve IY kombinasyonlarının kullanımı büyük önem taşımaktadır. İstanbul'da yalnızca FDM kullanıldığında (FDM-10, FDM-20 ve FDM-30), GÖS sırasıyla 16,18 yıl, 16,60 yıl ve 17,11 yıl olarak belirlenmiştir. IY entegrasyonu olmaksızın dahi nispeten uzun olan bu sürelerin temel nedeni, İstanbul'un ılıman ve nemli iklim özelliklerinin FDM'nin termal etkinliğini sınırlaması ve yapı kabuğunda kullanılan bu malzemelerin maliyetinin sağlanan enerji tasarrufuna kıyasla GÖS'ü uzatmasıdır. FDM ve IY'nin birlikte kullanımı da GÖS'ü daha da artırmaktadır. Soğutma dönemi için en iyi ısıl performansı sağlayan FDM(i)-30/IY-10 kombinasyonu 36,41 yıl, ısıtma dönemi için en uygun performansı sergileyen FDM(i)-30/IY-30 kombinasyonu ise 36,62 yıl GÖS vermektedir.

Üçüncü derece iklim bölgesinin temsili ili olan Ankara, soğuk kışlar ve sıcak yazlarla karakterize edilen karasal bir iklime sahiptir. Kış aylarında enerji tüketimi daha yüksek olmakla birlikte, yaz aylarında soğutma talebi de giderek artış göstermektedir (İl ve

İlçeler İstatistikleri, 2024). Yalnızca FDM içeren duvar kesitine sahip binalar için hesaplanan GÖS, FDM-10, FDM-20 ve FDM-30 sırasıyla 15,09 yıl, 15,50 yıl ve 16,01 yıl olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, Ankara gibi sert kış koşullarına sahip bölgelerde FDM'nin enerji tasarrufuna katkı sağladığını ortaya koymaktadır. FDM ve IY kombinasyonlarının GÖS değerleri, sağlanan enerji tasarrufuna rağmen Antalya'daki değerlere nazaran belirgin şekilde daha uzundur. Soğutma dönemi için ideal ısıl performansa sahip FDM(i)-30/IY-10 duvar kesitinde 33,39 yıl, ısıtma dönemi için en iyi performansı sağlayan FDM(i)-30/IY-30 kesitinde ise 34,02 yıl olarak hesaplanmıştır. Ankara'nın sert kış koşullarına rağmen, FDM kullanımı enerji verimliliği açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır. Bununla birlikte, yalnızca FDM içeren kesitlerde GÖS'ün 15 yılı, FDM-IY kombinasyonlarında ise 30 yılı aşması, bu teknolojilerin Ankara'da olduğu gibi İstanbul'da da ekonomik açıdan daha az avantajlı olmasına neden olmaktadır.

Dördüncü derece iklim bölgesinin temsili ili olan Van'da kış mevsimi oldukça uzun, soğuk ve sert geçerken yaz mevsimi ise kısa ve ılıman geçmektedir. Bu iklim özellikleri, binalarda özellikle kış aylarında yüksek ısıtma gereksinimini beraberinde getirmektedir (İl ve İlçeler İstatistikleri, 2024). Bu iklimde sadece FDM kullanılan duvar kesitlerine sahip binada (FDM-10, FDM-20 ve FDM-30), GÖS sırasıyla 10,39 yıl, 10,71 yıl ve 11,03 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, Van'da soğuk kış koşullarında FDM'lerin enerji tasarrufuna daha fazla katkı sağladığını ve İstanbul ve Ankara'ya kıyasla daha hızlı geri dönüş süresi sunduğunu göstermektedir. FDM-IY kombinasyonları diğer bölgelerdekine benzer olarak GÖS'ün uzamasına neden olmaktadır. Soğutma dönemi için ideal ısıl performans gösteren FDM-30/IY-10 kombinasyonu ile 23,38 yıl ve ısıtma dönemi için ideal ısıl performans gösteren FDM-30/IY-30 kombinasyonu ile 23,78 yıl GÖS tespit edilmiştir. Ancak, İstanbul ve Ankara'ya nazaran GÖS'lerinin daha kısa olması, söz konusu duvar kesitlerini Van'da ekonomik açıdan daha cazip hale getirmektedir.

Beşinci derece iklim bölgesinde bulunan Erzurum, Türkiye'nin en soğuk şehirlerinden biridir ve kış aylarının oldukça uzun ve karlı geçmesi ısıtma ihtiyacını oldukça arttırmaktadır (İl ve İlçeler İstatistikleri, 2024). Yalnızca FDM içeren duvar kesitlerine sahip binalarda (FDM-10, FDM-20 ve FDM-30), GÖS'ler sırasıyla 10,80 yıl, 11,14 yıl

ve 11,47 yıl olarak hesaplanmıştır. Soğutma dönemi için optimum ısıl performansa sahip FDM-30/IY-10 kombinasyonu ile 24,09 yıl ve ısıtma dönemi için optimum ısıl performans gösteren FDM-30/IY-30 kombinasyonu ile 24,47 yıl olup Van ile benzer aralıktadır.

Bütün iklim bölgelerinde gerek FDM gerekse IY kalınlıklarının 10 mm'den kademeli olarak 20 mm ve 30 mm'e arttırılması, daha fazla miktarda malzeme kullanımından ötürü, GÖS'ü nispeten arttırmaktadır. IY kalınlığı sabit tutulduğunda FDM kalınlığını arttırmak GÖS'ü nispeten daha fazla artırmasına rağmen, FDM kalınlığı sabit tutulduğunda IY kalınlığını arttırmanın GÖS'ü arttırıcı etkisi çok daha kısıtlı düzeydedir. Buradan, yenilikçi bir teknoloji ürünü olan FDM'nin kalınlık artışının üretim maliyeti üzerindeki etkisinin geleneksel IY'ye nazaran daha fazla olduğu çıkarılabilir.

Farklı iklim koşullarında yapı kabuğunda enerji verimliliği sağlamak üzere FDM ve FDM-IY kombinasyonları incelendiğinde, her bölgenin kendine özgü iklim özelliklerine bağlı olarak GÖS'lerde farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada ekonomik etkinliği incelenen bütün duvar kesitlerinde Antalya, İstanbul, Ankara, Van ve Erzurum için GÖS'leri sırasıyla 6,66-15,20, 16,18-36,62, 15,09-34,02, 10,39-23,78 ve 10,80-24,47 olarak tespit edilmiştir. Bilindiği gibi, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre, binaların ekonomik ömrü genellikle 50 yıl olarak kabul edilmektedir (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, 2018). Bu çalışmada tespit edilen GÖS'ler 50 yıldan daha kısa olduğundan dolayı, eğitim binalarında FDM ve IY'nin aynı duvar kesitinde bir arada kullanımı ekonomik kriterler bağlamında kabul edilebilir düzeydedir. Nitekim, bu araştırmada elde edilen GÖS değerleri, literatürde FDM-IY içeren duvar kesitlerine sahip binalarla gerçekleştirilen diğer araştırmaların sonuçlarıyla uyumlu olması bakımından önemlidir (Tablo 5.1.).

Tablo 5.1. Farklı çalışmalarda tespit edilen GÖS'lerin karşılaştırılması

Referans	Şehir/Ülke	GÖS (yıl)
M'hamdi ve diğ., 2022	Ben Guerir/Fas Tunus Asvan/Mısır	7,91-43,22
Zhang ve diğ., 2024	Xi'an/Çin	10,13-111,93

Tablo 5.1. (Devam) Farklı çalışmalarda tespit edilen GÖS'lerin karşılaştırılması

El-Raheim ve diğ., 2022	Kahire/Mısır Asvan/Mısır Sacramento/ABD Paris/Fransa Toronto/Kanada	40,40-57,60
Souayfane ve diğ., 2019	Dras/Hindistan Kiruna/İsveç Barentsburg/Norveç	7,87-51,10
Mevcut Çalışma	**Antalya/Türkiye**	**6,66-15,19**
	İstanbul/Türkiye	**16,18-36,62**
	Ankara/Türkiye	**15,08-34,02**
	Van/Türkiye	**10,39-23,77**
	Erzurum/Türkiye	**10,79-24,46**

Tunus (M'hamdi ve diğ., 2022) ve Xi'an/Çin (Zhang ve diğ., 2024) özelinde gerçekleştirilen çalışmalardaki sonuçlar, özellikle sıcak-ılıman ya da nemli iklim kuşaklarında yer alan bölgelerde FDM benzeri sistemlerin GÖS'ün oldukça uzayabildiğini göstermektedir. Kahire/Mısır'da yürüttüğü çalışmada (El-Raheim ve diğ., 2022) 40,40–57,60 yıl aralığında değişen GÖS'ler, yapı kabuğuna entegre edilen sistemlerin bölgesel iklim koşullarına uygun seçilmesinin önemine işaret etmektedir. Buna karşılık, mevcut çalışmada yer alan Antalya'da elde edilen 6,66 yıllık en kısa GÖS, hem Türkiye bağlamında hem de uluslararası literatürdeki değerlerle karşılaştırıldığında oldukça avantajlı bir sonucu temsil etmektedir. Özellikle sıcak ve kurak yazların baskın olduğu Antalya'da, FDM'nin ısıl tepki kapasitesinin etkin şekilde kullanılmasıyla sağlanan enerji tasarrufu, yatırım maliyetini kısa sürede sağlamaktadır.

İstanbul ve Ankara gibi hem ısıtma hem de soğutma yüklerinin önemli olduğu bölgelerde ise GÖS'ler, literatürdeki benzer iklim koşullarına sahip kentlerde elde edilen GÖS'lerle büyük oranda örtüşmektedir. Van ve Erzurum gibi kışın oldukça sert geçtiği bölgelerde ise GÖS'lerin Zhang ve diğ. (2024) ve El-Raheim ve diğ. (2022) çalışmalarıyla karşılaştırıldığında daha düşük olduğu ve bu bağlamda FDM–IY kombinasyonunun özellikle soğuk iklimlerde daha ekonomik hale geldiği anlaşılmaktadır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bir eğitim binasının ısıl performansını iyileştirmek ve yıllık ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimini azaltmak amacıyla FDM ve IY'nın Türkiye'nin beş farklı iklim bölgesinde birlikte kullanım olanakları araştırılmıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar ve geliştirilen öneriler aşağıda yer almaktadır:

- Dış ortam sıcaklığındaki dalgalanmaların iç ortamın ısıl konforunu olumsuz yönde etkilemesini engellemek amacıyla, FDM ve IY malzemelerinin aynı yapı kabuğunda birlikte kullanılması, Türkiye'nin iklim koşulları açısından uygundur.
- İç ortam sıcaklık dalgalanmasındaki azalma (SDA) miktarı ve yıllık ısıtma ve soğutma enerjisi talebi, FDM ve IY'nın konumu, kalınlığı ve FDM'nin erime sıcaklığından önemli ölçüde etkilenmektedir.
- Eğitim yapılarında kullanıcı yoğunluğunun fazla olması, iç ortam ısıl konfor gereksinimlerini artırmakta ve enerji tüketimi açısından önemli bir etki yaratmaktadır. Bu bağlamda, FDM ve IY malzemelerinin birlikte kullanımıyla elde edilen SDA ve enerji tasarrufu, eğitim yapıları için hem kullanıcı konforunu artırmakta hem de sürdürülebilirlik hedefleri açısından önemli katkı sunmaktadır.
- En yüksek SDA ve en düşük ısıtma ve soğutma enerjisi gereksinimi FDM'nin duvar kesitinin iç bölgesinde ve IY'nın dış bölgede yer aldığı alternatifte sağlanabilmiştir.
- Kış döneminde iç ortam sıcaklığını kontrol etmede daha başarılı olan ve en yüksek enerji tasarrufu sağlayan FDM ve IY kalınlıkları 30'ar mm'dir.
- Yaz döneminde FDM kalınlığının artması (30 mm'ye kadar), sıcaklık kontrolü ve enerji tasarrufu açısından olumlu etkiler sağlarken, IY'nin kalınlığının artması enerji tüketimini artırmıştır. Daha kalın IY katmanı, iç ortamdan dış ortama olan ısı transferini geciktirmiş ve bu durum mekanik soğutma ihtiyacını artırmıştır.
- Dış ortam sıcaklığı düşük olan kış döneminde erime ve tekrar katılaşmadan oluşan faz dönüşümünü daha kolay tamamlayan ideal FDM erime sıcaklığı 21 ºC olarak tespit edilmiştir. Yaz döneminde ise FDM için ideal erime sıcaklığı 27 °C olarak belirlenmiştir. Bu sıcaklık, yaz aylarında daha yüksek SDA ve daha düşük enerji tüketimi sağlamıştır.
- FDM ve IY içeren duvar kesitlerinin etkinliği Türkiye'nin iklim bölgelerine göre farklılık göstermektedir. Gerek SDA değerlerinde gerekse ısıtma ve soğutma enerjisi

tasarruf oranlarında daha yüksek etkinlik Ankara, Van ve Erzurum gibi gece ve gündüz arasındaki sıcaklık farklarının daha yüksek olduğu bölgelerde sağlanmıştır. Gün içerisindeki daha yüksek sıcaklık farkı FDM'nin faz dönüşümünü kolaylaştırmaktadır.

- FDM ve IY'nin birlikte kullanıldığı duvar kesitlerinde, sadece iklim sınıflandırması değil, aynı zamanda rakım ve güneş radyasyonu şiddeti gibi diğer coğrafi faktörler de dikkate alınmalıdır. Van ve Erzurum'un ortalama hava sıcaklıkları İstanbul ve Ankara'dan daha düşük olmasına rağmen, bu iki şehrin daha yüksek rakımları nedeniyle güneş radyasyonu şiddeti de daha yüksektir. Bu durum, öğle saatlerinde yapı kabuğunun ısı kazancını artırarak daha fazla soğutma enerjisi tüketilmesine neden olmuştur.
- Türkiye'deki farklı iklim bölgelerinin SDA ve ısıtma ve soğutma enerjisi tüketim miktarı farklı olmasına rağmen, kış döneminde 21 ºC erime sıcaklığına sahip 30 mm FDM ve 30 mm IY'nın ve yaz döneminde 27 ºC erime sıcaklığına sahip 30 mm FDM ve 10 mm IY'nın yapı kabuğunda birlikte kullanılmasıyla %9,12-19,95 oranında önemli enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Yapının yönünün ve mimari özelliklerinin, yapı kabuğunda yer alan malzeme türünün, termofiziksel özelliklerinin ve kalınlıklarının değiştirilmesiyle bu oranı daha fazla arttırmak mümkün olabilmektedir. Ancak malzeme türünün ve termofiziksel özelliklerinin değiştirilmesinden ve özellikle malzemelerin kalınlığının arttırılmasından kaynaklanan yapım maliyeti artışları göz önünde bulundurulmalıdır.
- Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde FDM-IY içeren duvar kesitlerinin GÖS'leri, iklim koşullarına ve seçilen malzeme kombinasyonlarına göre değişiklik göstermektedir. Genel olarak, GÖS en düşük olan bölgeler sıcak ve ılıman iklime sahip şehirlerdir. Daha yüksek GÖS ise nispeten daha soğuk bölgelerde tespit edilmektedir.
- Sıcak iklime sahip Antalya'da GÖS değerleri, Türkiye'nin diğer iklim bölgelerine nazaran daha kısa olduğundan ekonomik açıdan daha caziptir. En uzun GÖS değerleri ise İstanbul ve Ankara'da tespit edilmiştir.
- FDM ve IY'nin bir arada kullanıldığı kombinasyonlar ve malzeme kalınlıklarının artırılması GÖS'ü artırıcı temel etkenlerdir. Ancak, FDM-IY kombinasyonlarının ısıtma ve soğutma dönemi için sağladığı yüksek ısıl konfor, gün içerisinde SDA ve

daha yüksek toplam ısıtma ve soğutma enerjisi tasarruf oranları dikkate alındığında bu iki malzemenin bir arada kullanımı yararlıdır.

- Türkiye'nin iklim koşulları göz önüne alındığında, ekonomik etkinliği değerlendirilen yapı kabuklarında elde edilen GÖS'lerin (6,66-36,62 yıl) yönetmeliklerde belirtilen bina ekonomik ömründen (50 yıl) daha kısa olması, FDM-IY kombinasyonunun uygulanabilir ve umut vadeden bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

FDM-IY içeren duvar kesitlerinde tek katmanlı FDM kullanımına nazaran daha yüksek enerji tasarrufu sağlamak amacıyla çok katmanlı FDM kullanımının araştırılması, gelecekteki çalışmalarda önemli bir konu olarak ele alınmalıdır. Bu kapsamda, çok katmanlı FDM'nin etkinliğini değerlendirebilmek için farklı katman sayıları, kalınlıklar ve erime sıcaklıkları üzerinde detaylı simülasyon ve deneysel çalışmalar yapılmalıdır.

Simülasyon sonuçlarına dayalı elde edilen bulguların doğruluğunu artırmak ve daha güvenilir sonuçlar elde etmek amacıyla, gerçek koşullarda yapılan deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi önerilmektedir. Gerçek verilerle elde edilecek bulguların simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması, malzeme kombinasyonlarının ve yapı kabuğu tasarımının etkinliğini daha güvenilir şekilde değerlendirmeye olanak sağlayacaktır. Bu tür çalışmalar, gelecekteki bina tasarımlarında FDM ve IY'nin entegrasyonuna yönelik daha doğru ve yerel iklim koşullarına uyumlu senaryolar geliştirilmesine katkıda bulunacaktır.

KAYNAKLAR

Abanda, F.H., Byers, L. (2016). An Investigation of The Impact of Building Orientation on Energy Consumption in a Domestic Building Using Emerging BIM (Building Information Modelling). *Energy, 97,* 517–527.

Adilkhanova, I., Memon, S.A., Kim, J., Sheriyev, A. (2021). A Novel Approach to Investigate the Thermal Comfort of the Lightweight Relocatable Building Integrated with PCM in Different Climates of Kazakhstan During Summertime. *Energy*, *15*(217).

Al-Absi, Z.A., Mohd Isa, M.H., Ismail, M. (2020). Phase Change Materials (PCMs) and Their Optimum Position in Building Walls. *Sustainability*, *12*(4), 1294.

Alam, M., Sanjayan, J. G., Wilson, J. L., Jamil, H. (2014). Energy Saving Potential of Phase Change Materials in Major Australian Cities. *Energy and Buildings*, *78*, 192-201.

Al-Homoud, M.S. (2005). Performance Characteristics and Practical Applications of Common Building Thermal Insulation Materials. *Building Environment, 40*(3)*,* 353–366.

Alizadeh, M., Sadrameli, S.M. (2019). Indoor Thermal Comfort Assessment Using PCM Based Storage System Integrated with Ceiling Fan Ventilation: Experimental Design and Response Surface Approach. *Energy Building, 188*, 297–313.

Al-Yasiri, Q., Szabo, M. (2023). Building Envelope-Combined Phase Change Material and Thermal Insulation for Energy-Effective Buildings during Harsh Summer: Simulation-Based Analysis. *Energy for Sustainable Development*, *72*, 326-339.

Anayurt, M. (2021). Duvar ve Çatı Elemanlarında Faz Değiştiren Malzeme Kullanımına Dayalı Isıl Performansın Farklı İklim Koşullarına Bağlı Olarak Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 683818.

Arıcı, M., Bilgin, F., Krajčík, M., Nižetić, S., Karabay, H. (2022). Energy Saving and CO2 Reduction Potential of External Building Walls Containing Two Layers of Phase Change Material. *Energy*, *252*.

Arıcı, M., Bilgin, F., Nizetic, S., Karabay, H. (2020). PCM Integrated to External Building Walls: An Optimization Study on Maximum Activation of Latent Heat. *Applied Thermal Engineering*, *65*(1).

Arumugam, P., Ramalingam, V. (2024). Thermal Comfort Enhancement of Office Buildings Located Under Warm and Humid Climate Through Phase Change Material and Insulation Coupled with Natural Ventilation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments , 63*.

Arumugam, P., Ramalingam, V., Vellaichamy, P. (2022). Optimal Positioning of Phase Change Material and Insulation Through Numerical Investigations to Reduce Cooling Loads in Office Buildings. *Journal of Energy Storage*, *52*.

Asghari, M., Fereidoni, S., Fereidooni, L., Nabisi, M., Kasaeian, A. (2024). Energy Efficiency Analysis of Applying Phase Change Materials and Thermal Insulation Layers in a Building. *Energy and Buildings, 312*.

ASHRAE, (2019). *Design Guide for Cool Thermal Storage, 2nd ed.* https://www.techstreet.com/ashrae/standards/ashrae-design-guide-for-cool-thermal-storage-2nd-ed?product_id=2046532, (Ziyaret Tarihi: 24 Ekim 2024).

ASTM C1784-20. (2020). *Standard Test Method for Using a Heat Flow Meter Apparatus for Measuring Thermal Storage Properties of Phase Change Materials and Products, ASTM International,* West Conshohocken PA. https://www.astm.org/Standards/C1784.htm, (Ziyaret Tarihi: 24 Ekim 2024).

Auzeby, M., Wei, S., Underwood, C., Tindall, J., Chen, C., Ling, H., Buswell, R. (2016). Effectiveness of Using Phase Change Materials on Reducing Summer Overheating Issues in UK Residential Buildings with Identification of Influential Factors. *Energies*, *9*(8), 605.

Baetens, R., Jelle, B. P., Gustavsen, A. (2010). Phase Change Materials for Building Applications: A State-of-the-Art Review. *Energy and Buildings*, *42*, 1361–1368.

BASF. (2013). *BASF Phase Change Materials Put to the Test*. Micronal® in the Mark House. https://www.basf.com/gb/en/media/news-releases/2013/11/PCM-Mark, (Ziyaret Tarihi: 24 Ekim 2024).

Beltran, R.D., Martínez-Gomez, J. (2019). Analysis of Phase Change Materials (PCM) for Building Wallboards Based on the Effect of Environment. *Journal of Building Engineering, 24.*

Bruno, F., Belusko, M., Liu, M., Tay, N. H. S. (2014). Using Solid-Liquid Phase Change Materials (PCMs) in Thermal Energy Storage Systems. *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications,* 201-246.

Cabeza, L.F., Saffari, M., de Gracia, A., Fernandez, C. (2017). Simulation-Based Optimization of PCM Melting Temperature to Improve the Energy Performance in Buildings. *Applied Energy, 202*(15)*,* 420-434.

Chan, A. L. S. (2011). Energy and Environmental Performance of Building Facades Integrated with Phase Change Material in Subtropical Hong Kong. *Energy and Buildings, 43*(10)*,* 2947–2955.

Chen, C., Guo, H., Liu, Y., Yue, H., Wang, C. (2008). A New Kind of Phase Change Material (PCM) for Energy-Storing Wallboard. *Energy and Buildings*, *40*, 882-890.

Christopher, S., Vikram, M.P., Bakli, C., Thakur, A.K., Ma, Y., Ma, Z. (2023). Renewable Energy Potential Towards Attainment of Net-Zero Energy Buildings Status–a Critical Review. *Journal of Cleaner Production, 405.*

Coşkuner, A. (2018). Faz Değiştiren Malzemelerin Sıcak-Kuru ve Soğuk İklim Bölgelerindeki Yapı Kabuğu Enerji Performansının Karşılaştırmalı Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 521730.

Çakmak, F.A. (2019). Faz Değiştiren Malzemelerin Bina Dış Duvarlarında Kullanımının Isı Kazanç ve Kaybına Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 570027.

Çırakman, A. (2010). Faz değiştiren Madde İçeren Bina Güney Duvarının Deneysel Olarak İncelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 266578.

Dardouri, S., Tunçbilek, E., Khaldi, O., Arıcı, M., Sghaier, J. (2023). Optimizing PCM Integrated Wall and Roof for Energy Saving in Building Under Various Climatic Conditions of Mediterranean Region. *Buildings*, *13*(3), 806.

Depe, D. (2017). Yenilikçi Isı Depolama Sistemi Faz Değiştiren Malzemelerin Bina Enerji Verimliliği Üzerindeki Etkisinin Analizine Yönelik Yaklaşım: Diyarbakır ve Erzurum Örnekleri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 467221.

Derradji, L., Errebai, F.B., Amara, M. (2017). Effect of PCM in Improving the Thermal Comfort in Buildings. *Energy Procedia*, *107*, 157-161.

Dinçer, I., Rosen, M.A., (2002). *Thermal Energy Storage, Systems and applications*. John Wiley&Sons, New York.

Dizdar, H. (2009). İklimsel Tasarım Parametreleri Açısından Geleneksel ve Yeni Konutların Değerlendirilmesi: Diyarbakır Örneği. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 251004.

El-Raheim, D.A., Mohamed, A., Fatouh, M., Abou-Ziyan, H. (2022). Comfort and Economic Aspects of Phase Change Materials Integrated with Heavy-Structure Buildings in Hot Climates. *Applied Thermal Engineering*, *213*.

Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., Al-Hallaj, S. (2004). A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications. *Energy Conversion and Management*, *45*(9–10), 1597–1615.

Fiorito, F. (2014). Phase-Change Materials for Indoor Comfort Improvement in Lightweight Buildings. A parametric analysis for Australian climates. *Energy Procedia*, *57*, 2014-2022.

Fleischer, A. S. (2015). *Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials Fundamentals and Applications* (2015th ed.). Springer International Publishing, Cham.

Global Alliance for Buildings and Construction, International Energy Agency, United Nations Environment Programme. (2020). *2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector. United Nations Environment Programme*. https://globalabc.org/sites/default/files/2021-01/Buildings-GSR-2020_ES_ENGLISH.pdf, (Ziyaret Tarihi: 10 Ekim 2024).

Gracia, A., Cabeza, L. F. (2015). Phase Change Materials and Thermal Energy Storage for Buildings. *Energy and Buildings*, *103*, 414–419.

Gschwander, S., Haussmann, T., Hagelstein, G., Sole, A., Cabeza, L.F., Diarce, G., Hohenauer, W., Lager, D., Ristic, A., Rathgeber, C., Hennemann, P., Mehling, H., Penalosa, C., Lazaro, A. (2015). Standardization of PCM Characterization Via DSC, in: Proc. of the 13th International Conference on Energy Storage. *GREENSTOCK*, Bejing, Çin, 28 Mayıs 2015.

Guarino, F., Dermardiros, V., Chen, Y., Rao, J., Athienitis, A., Cellura, M., Mistretta, M. (2015). PCM Thermal Energy Storage in Buildings: Experimental Study and Applications. *Energy Procedia*, *70*, 219-228.

Günerhan, H. (2004). *Duyulur Isı Depolama ve Bazalt Taşı*. https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/2fc990265c712c4_ek.pdf, (Ziyaret Tarihi: 20 Ekim 2024).

Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A., Efthimiou, V. (2009). Overview of Current and Future Energy Storage Technologies for Electric Power Applications. *Renewable And Sustainable Energy Reviews, 13*(6-7)*,* 1513–1522.

Hamooleh, M. B., Torabi, A., Baghoolizadeh, M. (2024). Multi-Objective Optimization of Energy and Thermal Comfort Using Insulation and Phase Change Materials in Residential Buildings. *Building and Environment, 262*.

Harald, M., Michael, B., Thomas, H. (2022). PCM Products and Their Fields of Application - An Overview of the State in 2020/2021. *Journal of Energy Storage*, *51*.

Holechek, J.L., Geli, H.M.E., Sawalhah, M.N., Valdez, R. (2022). A Global Assessment: Can Renewable Energy Replace Fossil Fuels by 2050?. *Sustainability, 14.*

International Energy Agency. (2021). *Energy Efficiency 2021*. https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2021, (Ziyaret Tarihi: 10 Ekim 2024).

Izquierdo-Barrientos, M.A., Belmonte, J.F., Rodríguez-Sánchez, D., Molina, A.E., Almendros-Ibáñez, J.A. (2012). A Numerical Study of External Building Walls Containing Phase Change Materials (PCM). *Applied Thermal Engineering*, *47*, 73-85.

İlgar, G., Terhan, M. (2024). Dış Duvara Entegre Edilen Faz Değiştiren Malzemenin Kalınlığı ve Erime Sıcaklığının Bina Enerji Performansı ve CO2 Emisyon Azalımına Etkisi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, *39*(2), 959-976.

Jin, X., Medina, M.A., Zhang, X. (2014). On the Placement of a Phase Change Material Thermal Shield within the Cavity of Buildings Walls for Heat Transfer Rate Reduction. *Energy*, *73*, 780-786.

Jin, X., Medina, M.A., Zhang, X. (2016). Numerical Analysis for the Optimal Location of a Thin PCM Layer in Frame Walls. *Applied Thermal Engineering*, *103*, 1057-1063.

Kalbasi, R., Afrand, M. (2022). Which One is More Effective to Add to Building Envelope: Phase Change. *Journal of Cleaner Production , 367*.

Khudhair, A.M., Farid, M.M., Zalba, B., (2004). A Review on Energy Conservation in Building Applications with Thermal Storage by Latent Heat Using Phase Change Materials. *Energy Convers Management*, *45*, 263–75.

Kılınç, M. (2023). Çift Kabuk Cephelerde Faz Değiştiren Malzeme Kullanımının Enerji Tüketimi ve Isıl Konfora Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 805754.

Kishore, P., Kini, P., Raj, A. (2020). Optimization Based Feasibility Analysis for Energy Conservation Building Code Compliance of Opaque Wall Assemblies in Different Climatic Zones of India. *Procedia Manufacturing, 44,* 221-228.

Konstantinidou, C. (2010). Integration of Thermal Energy Storage in Buildings. Yüksek Lisans Tezi, The University of Texas, Austin.

Konuklu, Y. (2008). Mikrokapsüllenmiş Faz Değiştiren Maddelerde Termal Enerji Depolama ile Binalarda Enerji Tasarrufu. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 178648.

Konuklu, Y., Paksoy, H. (2011). Faz Değiştiren Maddeler ile Binalarda Enerji Verimliliği. *X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, Türkiye, 13-16 Nisan 2011.

Kośny, J. (2015). *PCM-Enhanced Building Components. An Application of Phase Change by Finite Element and Materials in Building Envelopes and Soft Computing Methods Internal Structures* (2015th ed.). Springer International Publishing, Cham.

Koşan, M., Aktaş, M. (2018). Faz Değiştiren Malzemelerle Termal Enerji Depolayan Bir Isı Değiştiricisinin Sayısal Analizi. *Politeknik Dergisi*, *21*(2), 403-409.

Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated. *Meteorologische Zeitschrift*, *15*, 259 - 263.

Kozak, M., Kozak, Ş. (2012). Enerji Depolama Yöntemleri. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 4*(2), 17-29.

Köse, E. (2019). Binalarda Enerji Korunumu Açısından Yapı Bileşenlerinde Kullanılan Faz Değiştiren Malzemelerin Performansının Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 553946.

Kuznik, F., David, D., Johannes, K., Roux, J. J. (2011). A Review on Phase Change Materials Integrated in Building Walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*, 379–391.

Lagou, A., Kylili, A., Sadauskiene, J., Fokaides, P.A. (2019). Numerical Investigation of Phase Change Materials (PCM) Optimal Melting Properties and Position in Building Elements Under Diverse Conditions. *Construction and Building Materials*, *225*, 452-464.

Lei, J., Yang, J. (2016). Energy Performance of Building Envelopes Integrated with Phase Change Materials for Cooling Load Reduction in Tropical Singapore. *Applied Energy*, *162*, 207-217.

M'hamdi, Y., Baba, K., Tajayouti, M., Nounah, A. (2022). Energy, Environmental, and Economic Analysis of Different Buildings Envelope Integrated with Phase Change Materials in Different Climates. *Solar Energy*, *243*, 91-102.

Mazman, M. (2006). Gizli Isı Depolaması ve Uygulamaları. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 183617.

McLaren, W. (2015). *The State of Phase Change Materials in Australian Building Design.* Architecture & Design. https://www.architectureanddesign.com.au/features/features-articles/the-state-of-phase-change-materials-in-australian, (Ziyaret Tarihi: 24 Ekim 2024).

Medina, M.A., Lee, K.O., Sun, X. (2016). Development and Verification of an EnergyPlus-Based Algorithm to Predict Heat Transfer Through Building Walls Integrated with Phase Change Materials. *Journal of Building Physics, 40,* 77–95.

Menyhart, K., Krarti, M. (2017). Potential Energy Savings from Deployment of Dynamic Insulation Materials for US Residential Buildings. *Building and Environment*, *114*, 203–218.

Mert M. S., Sert M., Mert H. H. (2018). Isıl Enerji Depolama Sistemleri için Organik Faz Değiştiren Maddelerin Mevcut Durumu Üzerine bir İnceleme. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, *6*(1), 161-174.

Mohseni, E., Tang, W. (2021). Parametric Analysis and Optimisation of Energy Efficiency of a Lightweight Building Integrated with Different Configurations and Types of PCM. *Renewable Energy*, *168*, 865-877.

Mohseni, E., Tang, W., Wang, S. (2019). Investigation of the Role of Nano-Titanium on Corrosion and Thermal Performance of Structural Concrete with Macro-Encapsulated PCM. *Molecules, 24*(7).

Okcu, M. (2011). Faz Değiştiren Maddelerde Erime ve Katılaşma Sürecinin Sayısal Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 301148.

Omara, A.A.M., Abuelnuor, A.A.A. (2019). Trombe Walls with Phase Change Materials: A Review. *Energy Storage, 2*(6).

Oral, G.K., Yener, A.K., Bayazit, N.T. (2004). Building Envelope Design with the Objective to Ensure Thermal, Visual and Acoustic Comfort Conditions. *Building and Environment*, *39*(3), 281-287.

Örengül, F. (2010). Gizli Isı Depolamalı Tavan Isıl Yalıtımının Deneysel Olarak Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 269970.

Özdemir, M. (2023). Yapı Bileşenlerinde Kullanılan Faz Değiştiren Malzemelerin Bina Isıtma ve Soğutma Yükü Üzerindeki Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 835718.

Öztürk, H. (2007). Güneş Enerjisinin Gizli Isı Tekniği ile Depolanması. *Tesisat Mühendisliği, 100,* 16-31.

Panão, M. R. O. (2020). Evolutionary Design of Heat Exchangers in Thermal Energy Storage. Araiz, M., (Ed.), *Heat Transfer - Design, Experimentation and Applications.* Londra: Intechopen.

Park, J.H., Lee, J., Wi, S., Jeon, J., Chang, S.J., Chang, J.D., Kim, S. (2019). Optimization of Phase Change Materials to Improve Energy Performance within Thermal Comfort Range in the South Korean Climate. *Energy and Buildings*, *185*, 12-25.

Qu, Y., Zhou, D., Xue, F., Cui, L. (2021). Multi-Factor Analysis on Thermal Comfort and Energy Saving Potential for PCM-Integrated Buildings in Summer. *Energy and Buildings*, *241*.

Rai, A. C. (2021). Energy Performance of Phase Change Materials Integrated into Brick. *Building and Environment* , *199*.

Ramirez, C.C., Jaramillo, F., Gomez, M. (2020). Systematic Review of Encapsulation and Shape-Stabilization of Phase Change Materials. *Journal of Energy Storage*, *30*.

Sæterli, R. K., Beceiro, J. S. (2022). *Thermochemical Energy Storage: The next generation thermal batteries?*. SINTEFblog, https://blog.sintef.com/energy/thermochemical-energy-storage-the-next-generation-thermal-batteries/, (Ziyaret Tarihi: 20 Ekim 2024).

Saffari, M., de Gracia, A., Fernández, C., Cabeza, L.F. (2017). Simulation-Based Optimization of PCM Melting Temperature to Improve the Energy Performance in Buildings. *Applied Energy*, *202*, 420-434.

Salihi, M., Fiti, M.E., Harmen, Y., Chhiti, Y., Chebak, A., Alaoui, F.E.M., Achak, M., Bentiss, F., Jama, C. (2022). Evaluation of Global Energy Performance of Building Walls Integrating PCM: Numerical Study in Semi-Arid Climate in Morocco. *Case Studies in Construction Materials*, *16*.

Seong, Y. B., Lim, J. H. (2013). Energy Saving Potentials of Fhase Change Materials Applied to Lightweight Building Envelopes. *Energies*, *6*(10), 5219–5230.

Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., Buddhi, D. (2009). Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *13*, 318–345.

Shumeli, H., Ziskind, G., Letan, R. (2010). Melting in a Vertical Cylindirical Tube: Numerical Investigation and Comprasion with Experiments. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 53,* 4082-4091.

Souayfane, F., Biwole, P.H., Fardoun, F., Achard, P. (2019). Energy Performance and Economic Analysis of a TIM-PCM Wall under Different Climates. *Energy*, *169*, 1274-1291.

Şensoy, S., Demircan, M., Ulupınar, Y., Balta, İ. (2005). *Türkiye iklimi*. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü. https://mgm.gov.tr/FILES/iklim/yayinlar/turkiye_iklimi.pdf, (Ziyaret Tarihi: 01 Ekim 2024).

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2024). *İl ve İlçeler İstatistikleri*. https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=parametrelerinTurkiyeAnalizi, (Ziyaret Tarihi: 01 Ekim 2024).

Terhan, M., İlgar, G. (2023). Investigation of Used PCM-Integrated into Building Exterior Walls for Energy Savings and Optimization of PCM Melting Temperatures. *Construction and Building Materials*, *369*.

Tokuç, A. (2013). Faz Değişim Malzemelerinin Isıl Enerji Depolama Amacıyla Yapı Elemanlarında Kullanılması. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 328326.

Toydemir, N., Gürdal, E., Tanaçan, L. (2019). *Yapı Elemanı Tasarımında Malzeme*. Literatür Yayıncılık, Türkiye.

TS 825, (2024). *Binalar için Isı Yalıtım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü*. Ankara.

Tunçbilek, E., Arıcı, M., Krajcik, M., Li, D., Nizetic, S., Papadopoulos, A.M. (2023). Enhancing Building Wall Thermal Performance with Phase Change Material and Insulation: A Comparative and Synergistic Assessment. *Renewable Energy*, *218*.

Tunçbilek, E., Arıcı, M., Krajcik, M., Nizetic, S., Karabay, H. (2020). Thermal Performance Based Optimization of an Office Wall Containing PCM Under Intermittent Cooling Operation. *Applied Thermal Engineering*, *179*.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. (2018). *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*. Ankara. Türkiye.

Türkiye Güneşlenme Potansiyeli Atlası, (2010). *T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü*, Ankara, Türkiye.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). 2022. *Elektrik ve Doğal Gaz Fiyatları, Dönem I: Ocak-Haziran, 2022*. https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=45567, (Ziyaret Tarihi: 01 Ekim 2024).

U.S. Department of Energy, Input Output Reference. (2021). *EnergyPlus™ Version 9.0.1 Documentation*, 139.

Uludaş, M.Ç., Tunçbilek, E., Yıldız, Ç., Arıcı, M., Li, D., Krajcik, M. (2022). PCM-Enhanced Sunspace for Energy Efficiency and CO2 Mitigation in a House in Mediterranean Climate. *Journal of Building Engineering*, *57*.

United Nations Environment Programme. (2021). *The Production Gap Report 2021*. https://www.unep.org/resources/production-gap-report-2021, (Ziyaret Tarihi: 10 Ekim 2024).

URL-1: https://www.dupont.com/, (Ziyaret Tarihi: 24 Ekim 2024).

URL-2: https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=https://glassx.jimdo.com/app/download/10112900052/Broschuere_klein_online.pdf?t=1503651139, (Ziyaret Tarihi: 24 Ekim 2024).

URL-3: https://zillerplus.de/project/smart/?lang=en, (Ziyaret Tarihi: 24 Ekim 2024).

URL-4: https://www.pcm-ral.org/pcm/en/pcm/certified-products/, (Ziyaret Tarihi: 24 Ekim 2024).

URL-5: https://www.puretemp.com/stories/success-story-embrace-infant-warmer, (Ziyaret Tarihi: 24 Ekim 2024).

URL-6: https://ista.org/, (Ziyaret Tarihi: 24 Ekim 2024).

URL-7: https://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/phasecube,%202021, (Ziyaret Tarihi: 24 Ekim 2024).

URL-8: https://www.usaid.gov/energy/powering-health/technical-standards/cold-chain-refrigeration, (Ziyaret Tarihi: 24 Ekim 2024).

VDI 2164 PCM-Energiespeichersysteme in der Gebaudetechnik. (2016). *PCM energystorage systems in building services, published*. https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-2164-pcm-energiespeichersysteme-in-der-gebaeudetechnik, (Ziyaret Tarihi: 24 Ekim 2024).

Verma, P. V., Singal, S. (2008) Review of Mathematical Modeling on Latent Heat Thermal Energy Storage Systems Using Phase-Change Material. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *12*(4), 999-1031.

Wang, H., Lu, W., Wu, Z., Zhang, G. (2020). Parametric Analysis of Applying PCM Wallboards for Energy Saving in High-Rise Lightweight Buildings in Shanghai. *Renewable Energy*, *145*, 52-64.

Xue, P., Zhang, R., Cheng, Y. (2023). High-Performance Envelope for Low-Carbon Buildings. *Building Simulation, 16*, 2207-2209.

Yılmaz, M. Ö. (2005a). Yeraltı Termal Enerji Depolamada Kullanılan Farklı Dolgu Maddelerinin Termal Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 198134.

Yılmaz, Z. (2005b). Akıllı Binalar Ve Yenilenebilir Enerji. *VII. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, Türkiye, 23-26 Kasım 2005.

Yu, N., Chen, C., Mahkamov, K., Han, F., Zhao, C., Lin, J., Jiang, L., Li, Y. (2020). Selection of a Phase Change Material and Its Thickness for Application in Walls of Buildings for Solar-Assisted Steam Curing of Precast Concrete. *Renewable Energy, 150*.

Zhang, L., Zhang, Q., Jin, L., Cui, X., Yang, X. (2024). Energy, Economic and Environmental (3E) Analysis of Residential Building Walls Enhanced with Phase Change Materials. *Journal of Building Engineering, 84*.

Zhou, D., Zhao, C. Y., Tian, Y. (2012). Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials (PCMs) in Building Applications. *Applied Energy*, *92*, 593–605.

Zou, L., Liu, X., Ni, J. (2005). Structure and Properties of Phase Change Material Susedin Concrete. *In "New century, New Materials and New Life", Proceedings of 2005 International Conference on Advanced Fibers and Polymer Materials ICAFPM*, Çin, 16 Ağustos 2005.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Yemenici, D. K., Ekiz Barış, K., (2024). Faz Değiştiren Malzeme ve Isı Yalıtım Malzemesi Kombinasyonunun Eğitim Binalarının Isıl Konforu ve Enerji Yüklerine Etkisi. Çelik, F. (Ed.), *Mimarlık, Planlama ve Tasarım Alanında Orijinal Araştırma ve Derlemeler* (1. Basım) (145-183), Ankara: Platanus Publishing.

Yemenici, D. K., Ekiz Barış, K., (2024). The Use of Phase Change Marerial in Architectural Design. *4. International Eurasia Congress of Building Materials, Architecture and Engineering Sciences*, Adana, Türkiye, 15 Aralık 2024.

Yemenici, D. K., Ekiz Barış, K., (2025). Enhancing Thermal Comfort and Energy-Saving Potential of the Buildings with Multiple-Layered Phase Change Material. *4th International Civil Engineering & Architecture Conference (ICEARC'25),* Trabzon, Türkiye, 17-19 Mayıs 2025.

Yemenici, D. K., Ekiz Barış, K., (2025). Mimarlıkta 3D Baskı Teknolojileri ve Uluslararası Uygulamaları. Kıasıf, G.Ç. (Ed.), *Mimarlık Alanında Uluslararası Araştırmalar – VI* (1. Basım) (231-248), İstanbul: Eğitim Yayınevi.

ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Bursa'da tamamladı. 2018 yılında Trakya Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 2019 yılında Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü'ne yatay geçiş yaptı ve 2022 yılında bölüm ikincisi olarak mezun oldu. 2023 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başlamıştır. Yüksek lisans çalışmaları kapsamında mimarlıkta malzeme ve teknoloji, akıllı yapı bileşenleri ve enerji etkin tasarım konularında araştırmalar yürütmektedir. Aynı zamanda ulusal ve uluslararası düzeyde çeşitli bildiriler sunmuş, bilimsel makale ve kitap bölümleri yayımlamıştır.