

T.C
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

BİNA ÇATISINA ENTEGRE MAKROKAPSÜLLENMİŞ FAZ DEĞİŞTİREN
MALZEMENİN KULLANIMININ BİNA ISIL PERFORMANSI VE CO₂
EMİSYONU ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS

Yusuf MOLLAHÜSEYİNOĞLU

HAZİRAN-2026
GÜMÜŞHANE



T.C

**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**BİNA ÇATISINA ENTEGRE MAKROKAPSÜLLENMİŞ FAZ DEĞİŞTİREN
MALZEMENİN KULLANIMININ BİNA ISIL PERFORMANSI VE CO₂
EMİSYONU ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF USING MACROENCAPSULATED
PHASE CHANGE MATERIAL INTEGRATED INTO A BUILDING ROOF ON
BUILDING THERMAL PERFORMANCE AND CO₂ EMISSIONS**

YÜKSEK LİSANS

Yusuf MOLLAHÜSEYİNOĞLU

HAZİRAN-2026

GÜMÜŞHANE



T.C

**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**BİNA ÇATISINA ENTEGRE MAKROKAPSÜLLENMİŞ FAZ DEĞİŞTİREN
MALZEMENİN KULLANIMININ BİNA ISIL PERFORMANSI VE CO₂
EMİSYONU ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF USING MACROENCAPSULATED
PHASE CHANGE MATERIAL INTEGRATED INTO A BUILDING ROOF ON
BUILDING THERMAL PERFORMANCE AND CO₂ EMISSIONS**

YÜKSEK LİSANS

Yusuf MOLLAHÜSEYİNOĞLU

Danışman: Doç Dr. Meryem TERHAN

**HAZİRAN-2026
GÜMÜŞHANE**

KABUL VE ONAY

Doç. Dr. Meryem TERHAN danışmanlığında, **Yusuf MOLLAHÜSEYİNOĞLU** tarafından hazırlanan “**Bina Çatısına Entegre Makrokapsüllenmiş Faz Değiştiren Malzemenin Kullanımının Bina Isıl Performansı ve CO₂ Emisyonu Üzerine Etkisinin İncelenmesi**” isimli bu çalışma, 16/06/2026 tarihinde yapılan lisansüstü tez savunma sınavı sonucunda **Oy Birliği** ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

.....
Prof. Dr. İsmet SEZER (Başkan)

.....
Doç. Dr. Meryem TERHAN (Danışman)

.....
Doç. Dr. Muhammed Arslan OMAR (Üye)

Lisansüstü tez savunma sınavında başarılı bulunarak kabul edilen bu tezin ciltlenmiş hali, ... /..... /..... tarihli ve / sayılı Enstitü Yönetim Kurulu toplantısında görüşülmüş ve tez yazım kılavuzuna uygun bulunarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Duygu ÖZDEŞ
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlamış olduğum “**Bina Çatısına Entegre Makrokapsüllenmiş Faz Değiştiren Malzemenin Kullanımının Bina Isıl Performansı ve CO₂ Emisyonu Üzerine Etkisinin İncelenmesi**” isimli bu tezinin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmaları kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi’nin lisanslı kullanıcısı olduğu intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlediği kısıtlara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezinin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği’nin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim.

16/06/2026

.....
Yusuf MOLAHÜSEYİNOĞLU

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının tüm aşamalarında bilgilerini, zamanını, deneyimlerini esirgemeyen, danışman hocam Sayın Doç. Dr. Meryem TERHAN'a, çalışmam da beni destekleyen, kolaylıklar sağlayan eşim Sayın Kübra MOLLAHÜSEYİNOĞLU'na, 35 yıldan beri eğitim camiasında olan öğrencilerine ve bizlere doğru yolu gösteren babam Sayın Yakup MOLLAHÜSEYİNOĞLU'na, hayatımın her anında yanımda olan fedakâr annem AYSEL MOLLAHÜSEYİNOĞLU'na, beni her zaman maddi ve manevi olarak destekleyen sevgili kardeşlerime, en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Yusuf MOLLAHÜSEYİNOĞLU
GÜMÜŞHANE – 2026

ÖZET

Bu tez çalışmasında, DesignBuilder yazılımı kullanılarak teras, kullanılan ve kullanılmayan çatı arası olmak üzere üç farklı bina projeleri modellenmiştir. İstanbul için 2024 yılına ait iklim verilerine göre konut binaları EnergyPlus programında simüle edilmiştir. Faz değiştiren malzeme olarak organik RT18HC, RT21HC, RT24HC, RT25HC, RT28HC ve inorganik RPCM18C, RPCM21C, RPCM23C, RPCM25C ve RPCM29 ticari ürünleri farklı kalınlıklarda kullanılmıştır. FDM entegre çatı tipli bina projelerinin çatı yapı bileşenleri farklı kombinasyonlar denenerek tasarlanmış ve enerji tasarrufunu maksimuma çıkaracak en verimli kombinasyonları seçilmiştir. Kombinasyonların FDM'li ve FDM'siz yapı bileşenleri karşılaştırılarak faz değiştiren malzemenin bina ısı performansına katkısı ve yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyaçlarına etkisi malzeme tipi, kalınlığı ve konuma bağlı olarak araştırılmıştır. Mahal içi ısı konfor değerlendirilmesinde kullanılan saatlik PMV ve PPD indeksleri ile toplam yıllık konfor saatleri FDM'li ve FDM'siz kombinasyonlar için elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. HVAC sisteminde kullanılan kömür, doğalgaz, fuel-oil, elektrik gibi yakıt tipleri için faz değiştiren malzemenin sağlayacağı CO₂ emisyon azalım miktarları hesaplanmıştır.

Kullanılan çatı aralı bina modeli için en yüksek ısıtma sezonu enerji kazancı % 31.80 ile Tip 2, 70 mm RT18HC, en yüksek soğutma sezonu enerji kazancı % 17.41 ile Tip 2, 60 mm RPCM21C kombinasyonlarında elde edilmiştir. Ayrıca, 70 mm RT18HC kombinasyonuna ait iç ortam yıllık konfor saatleri, teras çatı tipinde 3680 saat, kullanılmayan çatı aralı tipte 3729 saat ve kullanılan çatı aralı tipte 4078 saat olarak hesaplanmıştır. HVAC sisteminde kullanılan farklı yakıt tipleri ve tasarlanan FDM'li farklı çatı kombinasyonlarına bağlı olarak CO₂ emisyon azalım miktarları 1694.83-12667.3 kg CO₂/yıl arasında değişmektedir.

Anahtar Kelimeler: Bina modelleme, CO₂ emisyonu, DesignBuilder, Faz değiştiren malzemeler, Isıl konfor

SUMMARY

In this thesis, three residential building models with flat, inhabited attic, and uninhabited attic roof configurations were developed using DesignBuilder and simulated in EnergyPlus based on 2024 climate data for Istanbul. Commercial organic PCMs (RT18HC, RT21HC, RT24HC, RT25HC, and RT28HC) and inorganic PCMs (RPCM18C, RPCM21C, RPCM23C, RPCM25C, and RPCM29) were evaluated at different thicknesses. Various PCM-integrated roof configurations were designed, and the optimum combinations providing the highest energy savings were identified. Their thermal performance was assessed by comparing annual heating and cooling energy demands with and without PCM. The effects of PCM type, thickness, and installation location on building energy performance were investigated. Indoor thermal comfort was evaluated using hourly Predicted Mean Vote (PMV), Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD), and annual thermal comfort hours. Annual CO₂ emission reductions were also calculated for HVAC systems using coal, natural gas, fuel oil, and electricity.

Among the inhabited attic roof configurations, the highest heating energy reduction was achieved with the Type 2 roof incorporating 70 mm RT18HC, providing 31.80% energy savings, while the greatest cooling energy reduction was obtained with the Type 2 roof incorporating 60 mm RPCM21C, achieving 17.41% savings. The annual thermal comfort hours for the 70 mm RT18HC configuration were 3680, 3729, and 4078 hours for the flat, uninhabited attic, and inhabited attic roof models, respectively. Annual CO₂ emission reductions ranged from 1694.83 to 12667.30 kg CO₂/year, depending on the PCM configuration and HVAC fuel type.

Keywords: Building modeling, CO₂ emissions, DesignBuilder, Phase change materials, Thermal comfort

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	III
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI.....	IV
TEŞEKKÜR.....	V
ÖZET.....	VI
SUMMARY	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLolar DİZİNİ	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XIII
SİMGELER VE KISATMALAR DİZİNİ.....	XVII
1. GİRİŞ	1
1.1. CO ₂ Gazının Dünyamıza Etkisi	2
1.2. Bina Kabuğunda Enerji İhtiyacını ve CO ₂ Salımını Azaltmanın Yöntemleri	3
1.2.1. Pasif Ev Tasarım Stratejileri	4
1.2.2. Yüksek Performanslı Pencereleler	5
1.2.3. Bina Yönleneş ve Kompakt Tasarım	5
1.2.4. Pasif Güneş Kazançları	5
1.2.5. Isıl Kütle ve Enerji Depolama.....	5
1.2.6. Doğal Havalandırma	5
1.2.7. Isı Geri Kazanımlı Mekanik Havalandırma (MVHR)	5
1.2.8. Yüksek Yansıtıcılı ve Yeşil Çatılar.....	6
2. BİNA KABUĞUNDA ISIL ENERJİ DEPOLAMA	7
2.1. Isıl Enerji Depolama Yöntemleri	8
2.1.1. Duyulur Isıl Enerji Depolama	8
2.1.2. Gizli Isıl Enerji Depolama	8
2.2. Faz Değıştiren Malzemeler	9
2.1.1. Faz Değıştirilen Malzemelerin Sınıflandırılması	10
2.3. FDM'lerin Bina Kabuğunda Uygulanma Teknikleri	12
2.3.1. Daldırma Tekniğı	13
2.3.2. Doğrudan Birleştirme Tekniğı	13
2.3.3. Kapsülleme Tekniğı	13
2.4. Bina Kabuğunda Dış Katmanlarda FDM Kullanım Uygulamaları.....	17
2.4.1. Bina Kabuğunun Duvardaki FDM Kullanım Uygulamaları.....	17

2.4.2. Bina Kabuğunun Döşemesindeki FDM Kullanım Uygulamaları	19
2.4.3. Bina Kabuğunun Çatısındaki FDM Kullanım Uygulamaları	20
2.5. FDM'nin Kullanıldığı Simülasyon Programları	21
2.6. Faz Değiştiren Malzemelerin Isıl Performansları	21
3. LİTERATÜR ÖZETİ	25
4. METARYAL VE YÖNTEM	31
4.1. Simülasyonu Yapılan Bina Modeli İçin Bilgiler	31
4.1.1. Lokasyon ve İklimsel Veriler	31
4.1.2. Simülasyonu Yapılan Binanın Program Bilgileri	32
4.1.3. Teras Çatılı Binanın Mimari Bilgileri	32
4.1.4. Kullanılmayan Çatı Aralı Binanın Mimari Bilgileri	34
4.1.5. Kullanılan Çatı Aralı Binanın Mimari Bilgileri	36
4.2. Faz Değiştiren Malzemelerin Özellikleri	38
4.3. Çatı Yüzeyi Isıl Enerji Dengesi	38
4.4. PMV ve PPD Konfor Hesabı:	40
4.5. CO ₂ Emisyon Hesabı	42
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	44
5.1. Teras Çatılı Binada Entegre Edilen Faz Değiştiren Malzemelerin Termal Performanslarının İrdelenmesi	44
5.1.1. FDM'siz ve FDM'li Çatı Katmanların Detayları;	44
5.1.2. RTHC ve RPCM Faz Değiştiren Malzemelerin Belirlenen Teras Çatılı Tip-1 Bina Modelinde Yıllık Isıtma ve Soğutma Enerji Performanslarının İncelenmesi	52
5.1.3. RTHC ve RPCM Faz Değiştiren Malzemelerin Teras Çatılı Tip-2 Bina Modelinde Yıllık Isıtma ve Soğutma Enerji Performanslarının İncelenmesi	57
5.1.4. RTHC ve RPCM Faz Değiştiren Malzemelerin Teras Çatılı Tip-3 Bina Modelinde Yıllık Isıtma ve Soğutma Enerji Performanslarının İncelenmesi	61
5.1.5. RTHC ve RPCM Faz Değiştiren Malzemelerin Teras Çatılı Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 Bina Modellerinde Aylık Isıtma ve Soğutma Enerji Performanslarının İncelenmesi	66
5.2. Kullanılmayan Çatı Aralı Binada Entegre Edilen Faz Değiştiren Malzemelerin Termal Performanslarının İrdelenmesi	73
5.2.1. FDM'siz ve FDM'li Çatı Katmanların Detayları;	73
5.2.2. RTHC ve RPCM Faz Değiştiren Malzemelerin Kullanılmayan Çatı Aralı Tip-2 Bina Modelinde Yıllık Isıtma ve Soğutma Enerji Performanslarının İncelenmesi	78

5.2.3. RTHC ve RPCM Faz Değiştiren Malzemelerin Kullanılmayan atı Aralı Tip-2 Bina Modelinde Aylık Isıtma ve Soğutma Enerji Performanslarının İncelenmesi	81
5.3.Kullanılan atı Aralı Binada Entegre Edilen Faz Değiştiren Malzemelerin Termal Performanslarının İrdelenmesi.....	84
5.3.1. FDM’siz ve FDM’li atı Katmanların Detayları;.....	84
5.3.2. RTHC ve RPCM Faz Değiştiren Malzemelerin Kullanılan atı Aralı Tip-2 Bina Modelinde Yıllık Isıtma ve Soğutma Enerji Performanslarının İncelenmesi.....	89
5.3.3. RTHC ve RPCM Faz Değiştiren Malzemelerin Kullanılan atı Aralı Tip-2 Bina Modelinde Aylık Isıtma ve Soğutma Enerji Performanslarının İncelenmesi	91
5.4. Bina Modellerindeki Verimli atı Tiplerindeki FDM’lerin Isıl Konfor Analizleri.	94
5.4.1. PMV Analizleri	94
5.4.2. PPD Analizleri	97
5.5. CO ₂ Emisyon Azalımı Bulguları.....	101
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	104
KAYNAKÇA	107
ÖZGEçMİş	113

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Simulasyon yapılan binanın lokasyon verileri.....	32
Tablo 2. Simülasyonu yapılan teras çatılı binanın mimari bilgileri.....	33
Tablo 3. Simülasyonu yapılan kullanılmayan çatı aralı binanın mimari bilgileri.....	35
Tablo 4. Simülasyonu yapılan kullanılan çatı aralı binanın mimari bilgileri.....	37
Tablo 5. Faz Değiştiren Malzemelerin Isıl Özellikleri.....	38
Tablo 6. PMV Termal Algı Ölçeği (ASHRAE, 2017).....	40
Tablo 7. Giyim Yalıtımı Tablosu (ASHRAE Standard 55).....	41
Tablo 8. Metabolik Oran Tablosu (ASHRAE Standard 55).....	41
Tablo 9. Yakıt tiplerine göre kabul edilen CO ₂ emisyon faktörü(IPCC, 2006).....	42
Tablo 10. FDM'siz teras çatılı bina modelindeki çatı tiplerine göre yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyaçları.....	46
Tablo 11. FDM'li teras çatılı bina modelindeki çatı tiplerine göre 25 °C erime sıcaklığında yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyaçları	46
Tablo 12. RTHC entegre çatı tiplerin kalınlık ve erime sıcaklığına göre ısı geçirgenlik katsayısı.....	50
Tablo 13. RPCM entegre çatı tiplerin kalınlık ve erime sıcaklığına göre ısı geçirgenlik katsayısı.....	51
Tablo 14. RTHC ve RPCM entegreli tip-1 teras çatılı bina modelinde erime sıcaklığına göre yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyacı(kWh)	52
Tablo 15. RTHC ve RPCM entegreli tip-1 teras çatılı bina modelinde erime sıcaklığına göre yıllık ısıtma ve soğutma enerji kazançları(%)	53
Tablo 16. RTHC ve RPCM entegreli tip-2 teras çatılı bina modelinde erime sıcaklığına göre yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyacı(kWh)	57
Tablo 17. RTHC ve RPCM entegreli tip-2 teras çatılı bina modelinde erime sıcaklığına göre yıllık ısıtma ve soğutma enerji kazançları(%)	58
Tablo 18. RTHC ve RPCM entegreli tip-3 teras çatılı bina modelinde erime sıcaklığına göre yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyacı(kWh)	62
Tablo 19. RTHC ve RPCM entegreli tip-3 teras çatılı bina modelinde erime sıcaklığına göre yıllık ısıtma ve soğutma enerji kazançları(%)	63
Tablo 20. RTHC ve RPCM en verimli erime sıcaklıklarındaki tip-1, tip-2 ve tip-3 teras çatılı bina modelinde aylık ısıtma ve soğutma sezonluk verimleri.....	67

Tablo 21. FDM'siz kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki çatı tiplerine göre yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyaçları	74
Tablo 22. FDM'li kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki çatı tiplerine göre 25 °C erime sıcaklığında yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyaçları	75
Tablo 23. RTHC ve RPCM entegre tip-2 de kalınlık ve erime sıcaklığına göre ısı geçirgenlik katsayısı.....	77
Tablo 24. RTHC ve RPCM entegreli tip-2 kullanılmayan çatı aralı bina modelinde erime sıcaklığına göre yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyacı (kWh).....	79
Tablo 25. RTHC ve RPCM entegreli tip-2 kullanılmayan çatı aralı bina modelinde erime sıcaklığına göre yıllık ısıtma ve soğutma enerji kazançları (%).....	80
Tablo 26. RTHC ve RPCM en verimli erime sıcaklıklarındaki tip-2 kullanılmayan çatı aralı bina modelinde aylık ısıtma ve soğutma sezonluk verimleri.....	81
Tablo 27. FDM'siz kullanılan çatı aralı bina modelindeki çatı tiplerine göre yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyaçları	85
Tablo 28. FDM'li kullanılan çatı aralı bina modelindeki çatı tiplerine göre 25 °C erime sıcaklığında yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyaçları	86
Tablo 29. RTHC ve RPCM entegre tip-2 de kalınlık ve erime sıcaklığına göre ısı geçirgenlik katsayısı.....	88
Tablo 30. RTHC ve RPCM entegreli tip-2 kullanılan çatı aralı bina modelinde erime sıcaklığına göre yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyacı (kWh)	90
Tablo 31. RTHC ve RPCM entegreli tip-2 kullanılan çatı aralı bina modelinde erime sıcaklığına göre yıllık ısıtma ve soğutma enerji kazançları (%)	91
Tablo 32. RTHC ve RPCM en verimli erime sıcaklıklarındaki tip-2 kullanılan çatı aralı bina modelinde aylık ısıtma ve soğutma sezonluk verimleri.....	92
Tablo 33. 08.12.2024 tarihli bina modellerindeki verimli çatı tiplerin saatlik PPD indeksi	99
Tablo 34. 06.07.2024 tarihli bina modellerindeki verimli çatı tiplerin saatlik PPD indeksi	100
Tablo 35. Çatı ve yakıt tiplerine göre çatı entegre FDM'nin sağlayacağı yıllık CO ₂ emisyon azalım miktarları(kg CO ₂)	102
Tablo 36. Çatı ve yakıt tiplerine göre çatı entegre FDM'nin sağlayacağı çatı m ² düşen yıllık CO ₂ emisyon azalım miktarları(kg CO ₂ /m ²)	103

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Isıl enerji depolama yöntemleri (Sharma vd., 2009).....	8
Şekil 2. Gizli ısı ve duyulur ısı karşılaştırma grafiği (Bayram, 2021).	9
Şekil 3. Faz değişimi sırasında hissedilir ısı ve gizli ısı ile sıcaklığın kontrolü (Zalba vd., 2003).	10
Şekil 4. Bina elemanlarında kullanılan FDM birleştirme yöntemlerinin araştırma ve geliştirme zaman çizelgesi (Lee, 2014).	13
Şekil 5. BASF firması tarafından üretilen sıvı halde ve kurutulmuş toz halinde mikrokapsüllenmiş parafin (fotoğraf: BASF), (Mehling ve Cabeza, 2008).	14
Şekil 6. Metal top (a), Küre (b), Alüminyum paket (c), Alüminyum panel (d), Tüp (e), Levha (f) İçerisinde makrokapsüllenmiş FDM'ler (Rathore, 2022).	14
Şekil 7. FDM'lerin kapsülasyon yönteminin akış diyagramı (Coşkuner, 2018).....	15
Şekil 8. Aktif sistemlerde hava ve suyun termal değişimli bileşen olarak kullanılması (Rodriguez-Ubinas vd., 2012) (Merve Kılınç tarafından revize oluşturulmuştur.).....	17
Şekil 9. Pasif sistemlerde güneş kazanç sistemi (Casini, 2016).....	17
Şekil 10. FDM'nin iç duvarda kullanım örnekleri (Casini, 2016).	18
Şekil 11. Mikrokapsüllenmiş FDM'ye Sahip Alçı Panel ve Eşdeğer Termal Kapasiteye Sahip Duvar Örnekleri (Casini, 2016).	18
Şekil 12. Yaz ve kış mevsimlerinde glassX kristal FDM'li cam kullanımı (Casini, 2016).	19
Şekil 13. Stabilize FDM plakası (a) ve FDM'nin Elektron mikroskobu fotoğrafı (Lin vd., 2005).	19
Şekil 14. Elektrikli Isıtıcı (a) ve Şekil Stabilize FDM Plakaları (b) Yerleşimi ile Ahşap Zemin (c) Oluşumu (Lin vd., 2005).....	20
Şekil 15. Ahşap çerçeveli çatıya monte edilen FDM (URL-1).....	20
Şekil 16. Faz değişim malzemeleri kullanan serin çatı sisteminin enerji tüketimde tasarruf üzerindeki etkisine ilişkin şematik gösterim (Kim vd., 2020).....	21
Şekil 17. Simülasyonu yapılan teras çatılı bina	33
Şekil 18. Teras çatılı bina modelindeki Blok5-Zone15 çatısına düşen güneş açısı-1	34
Şekil 19. Teras çatılı bina modelindeki Blok5-Zone15 çatısına düşen güneş açısı-2.....	34

Şekil 20. Simülasyonu yapılan kullanılmayan çatı aralı bina	35
Şekil 21. Kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki Roof1-Zone1 çatısına düşen güneş açısı-1	35
Şekil 22. Kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki Roof1-Zone1 çatısına düşen güneş açısı-2	36
Şekil 23. Simülasyonu yapılan kullanılan çatı aralı bina	36
Şekil 24. Kullanılan çatı aralı bina modelindeki Roof1-Zone2 çatısına düşen güneş açısı-1	37
Şekil 25. Kullanılan çatı aralı bina modelindeki Roof1-Zone2 çatısına düşen güneş açısı-2	37
Şekil 26. Teras çatıda belirlenen FDM'siz çatı kesiti tip-1.....	45
Şekil 27. Teras çatıda belirlenen FDM'siz çatı kesiti tip-2.....	45
Şekil 28. Teras çatıda belirlenen FDM'siz çatı kesiti tip-3.....	45
Şekil 29. Teras çatıda belirlenen FDM'siz çatı kesiti tip-4.....	46
Şekil 30. RT25HC ve RPCM25C entegre teras çatılı bina modelindeki çatı tiplerine göre yıllık ısıtma enerjisi kazancı	48
Şekil 31. RT25HC ve RPCM25C entegre teras çatılı bina modelindeki çatı tiplerine göre yıllık soğutma enerjisi kazancı	48
Şekil 32. Teras çatıda belirlenen FDM'li çatı kesiti tip-1	49
Şekil 33. Teras çatıda belirlenen FDM'li çatı kesiti tip-2	49
Şekil 34. Teras çatıda belirlenen FDM'li çatı kesiti tip-3	49
Şekil 35. FDM'li malzemelli teras çatıda tiplere ve kalınlıklara göre ısıl geçirgenlik katsayısı.....	50
Şekil 36. Tip-1'deki teras çatılı bina modelinde FDM'siz ve FDM'li katmanların yıllık ısıtma enerji ihtiyacı.....	55
Şekil 37. Tip-1'deki teras çatılı bina modelinde FDM'siz ve FDM'li katmanların yıllık soğutma enerji ihtiyacı	55
Şekil 38. Tip-1'deki teras çatılı bina modelinde FDM'li katmanların yıllık ısıtma enerji kazançları	56
Şekil 39. Tip-1'deki teras çatılı bina modelinde FDM'li katmanların yıllık soğutma enerji kazançları	56
Şekil 40. Tip-2'deki teras çatılı bina modelinde FDM'siz ve FDM'li katmanların yıllık ısıtma enerji ihtiyacı.....	60

Şekil 41. Tip-2'deki teras çatılı bina modelinde FDM'siz ve FDM'li katmanların yıllık soğutma enerji ihtiyacı	60
Şekil 42. Tip-2'deki teras çatılı bina modelinde FDM'li katmanların yıllık ısıtma enerji kazançları	61
Şekil 43. Tip-2'deki teras çatılı bina modelinde FDM'li katmanların yıllık soğutma enerji kazançları	61
Şekil 44. Tip-3'deki teras çatılı bina modelinde FDM'siz ve FDM'li katmanların yıllık ısıtma enerji ihtiyacı	64
Şekil 45. Tip-3'deki teras çatılı bina modelinde FDM'siz ve FDM'li katmanların yıllık soğutma enerji ihtiyacı	65
Şekil 46. Tip-3'deki teras çatılı bina modelinde FDM'li katmanların yıllık ısıtma enerji kazançları	65
Şekil 47. Tip-3'deki teras çatılı bina modelinde FDM'li katmanların yıllık soğutma enerji kazançları	66
Şekil 48. Teras çatılı bina modelindeki belirlenen tiplere göre ısıtma sezonu için aylık ısıtma enerji kazançları	69
Şekil 49. Teras çatılı bina modelindeki belirlenen tiplere göre soğutma sezonu için aylık soğutma enerji kazançları	69
Şekil 50. 08.12.2024 tarihli tip-1, tip-2 ve tip-3 bina modelinde RT18HC(70 mm) saatlik sıcaklık değişimi	70
Şekil 51. 08.12.2024 tarihli tip-1 teras çatılı bina modelindeki RT18HC(70 mm) saatlik sıcaklık değişimi	71
Şekil 52. 06.07.2024 tarihli teras çatılı bina modelindeki tip-1, tip-2 ve tip-3 bina modelinde saatlik FDM sıcaklık değişimi	72
Şekil 53. 06.07.2024 tarihli tip-2 teras çatılı bina modelindeki RPCM21HC(70 mm) saatlik sıcaklık değişimi	72
Şekil 54. Kullanılmayan çatı aralı bina modelinin FDM'siz çatı kesiti tip-1	74
Şekil 55. Kullanılmayan çatı aralı bina modelinin FDM'siz çatı kesiti tip-2	74
Şekil 56. Kullanılmayan çatı aralı bina modelinin FDM'siz çatı kesiti tip-3	74
Şekil 57. RT25HC ve RPCM25C entegre kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki çatı tiplerine göre yıllık ısıtma enerji kazancı	76
Şekil 58. RT25HC ve RPCM25C entegre kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki çatı tiplerine göre yıllık soğutma enerji kazancı	76

Şekil 59. Kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki FDM’li çatı kesiti tip-2.....	77
Şekil 60. Kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki belirlenen tip-2 aylık ısıtma ve soğutma sezonu için enerji kazançları	82
Şekil 61. 08.12.2024 tarihli tarihli kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki RT18HC(70 mm) saatlik sıcaklık değişimi	83
Şekil 62. 06.07.2024 tarihli kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki RPCM21C(40 mm) saatlik sıcaklık değişimi	83
Şekil 63. Kullanılan çatı aralı bina modeli için belirlenen FDM’siz çatı kesiti tip-1	85
Şekil 64. Kullanılan çatı aralı bina modeli için belirlenen FDM’siz çatı kesiti tip-2	85
Şekil 65. Kullanılan çatı aralı bina modeli için belirlenen FDM’siz çatı kesiti tip-3	85
Şekil 66. RT25HC ve RPCM25C entegre kullanılan çatı aralı bina modelindeki çatı tiplerine göre yıllık ısıtma enerji kazancı.....	87
Şekil 67. RT25HC ve RPCM25C entegre kullanılan çatı aralı bina modelindeki çatı tiplerine göre yıllık soğutma enerji kazancı.....	87
Şekil 68. Kullanılan çatı aralı bina modelindeki FDM’li çatı kesiti tip-2.....	88
Şekil 69. Kullanılan çatı aralı bina modelindeki belirlenen tip-2 aylık ısıtma ve soğutma sezonu için enerji kazançları.....	93
Şekil 70. 08.12.2024 tarihli kullanılan çatı aralı bina modelindeki RT18HC(70 mm) saatlik sıcaklık değişimi	93
Şekil 71. 06.07.2024 tarihli kullanılan çatı aralı bina modelindeki RPCM21C(70 mm) saatlik sıcaklık değişimi	94
Şekil 72. Teras çatı bina modelinde FDM’li tip-1 çatı tipinde PMV ile yıllık toplam konfor saati.....	95
Şekil 73. Kullanılmayan çatı aralı bina modelinde FDM’li tip-2 çatı tipinde PMV ile yıllık toplam konfor saati	96
Şekil 74. Kullanılan çatı aralı bina modelinde FDM’li tip-2 çatı tipinde PMV ile yıllık toplam konfor saati	96
Şekil 75. 08.12.2024 tarihli bina modellerindeki verimli çatı tiplerinin saatlik PPD indeks kazancı.....	101
Şekil 76. 06.07.2024 tarihli bina modellerindeki verimli çatı tiplerinin saatlik PPD indeks kazancı.....	101
Şekil 77. Bina modellerindeki en verimli FDM’li modellerin yıllık FDM’li çatı alanına(m ²) düşen kg CO ₂ emisyon azaltımı.....	103

SİMGELER VE KISATMALAR DİZİNİ

ASHRAE	: American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers
°C	: Santigrat derece
CO ₂	: Karbondioksit
Csa	: Hot-summer Mediterranean climate
FDM	: Faz değıştiren malzemeler
HDPE	: Yüksek yoğunluklu polietilen
HVAC	: Heating, Ventilation, Air Conditioning
kWh	: Kilowatt saat
m	: Metre
m ²	: Metrekare
mm	: Milimetre
PCM	: Phase-change material
PMV	: Predictive Mean Vote
PPD	: Predicted Percentage of Dissatisfied
vd.	: Ve diğeri
W	: Watt

1. GİRİŞ

Günümüzde artan nüfus, kentleşme ve teknolojik gelişmelerle birlikte enerjiye olan talep hızla artmaktadır. Dünya üzerindeki tüm ülkelerin yenilenebilir enerji ve enerji verimlilik açısından düzenledikleri programlar, açıklanan hedefler, sürdürülebilir mevcut hedeflerinin ilerlenebilmesi enerji güvenliği açısından önemlidir. Küresel enerji tüketiminin önemli bir bölümü binalar tarafından gerçekleştirilmekte olup, binalar aynı zamanda sera gazı emisyonlarının da başlıca kaynakları arasında yer almaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı verilerine göre, dünya genelinde toplam enerji tüketiminin yaklaşık %35–40'ı ve CO₂ emisyonlarının yaklaşık %30'u bina sektöründen kaynaklanmaktadır. Bu durum, bina enerji performansının iyileştirilmesini ve çevresel etkilerin azaltılmasını sürdürülebilir kalkınma açısından zorunlu hale getirmiştir (IEA, 2021).

Bina enerji tüketiminin önemli bir kısmı, ısıtma ve soğutma amaçlı enerji kullanımından oluşmaktadır. Bu enerji ihtiyacı büyük ölçüde bina kabuğunun ısısal özelliklerine bağlıdır. Bina kabuğu elemanları arasında yer alan çatı sistemleri, güneş radyasyonuna doğrudan maruz kalmaları ve dış ortam sıcaklık değişimlerinden yoğun şekilde etkilenmeleri nedeniyle bina ısısal performansı üzerinde kritik bir role sahiptir. Özellikle yaz aylarında çatıdan kaynaklanan ısı kazançları, iç ortam sıcaklıklarının artmasına ve soğutma enerjisi ihtiyacının yükselmesine neden olmaktadır (ASHRAE, 2017).

Son yıllarda, bina kabuğunun ısısal performansını artırmaya yönelik yenilikçi çözümler arasında faz değiştiren malzemelerin (FDM) kullanımı ön plana çıkmaktadır. Faz değiştiren malzemeler, belirli bir sıcaklık aralığında katı–sıvı faz geçişi sırasında yüksek miktarda gizli ısı depolayabilme özellikleri sayesinde ısısal enerji depolama potansiyeline sahiptir. Bu özellikleri sayesinde FDM'ler, iç ortam sıcaklık salınımlarını azaltmakta, ısıtma ve soğutma yüklerini dengelemekte ve bina enerji tüketimini düşürmektedir (IEA, 2020).

Binalarda iklimsel koşullar dikkate alınarak öncelikle yıllık ısıtma, soğutma ve toplam enerji harcamalarının azaltılması daha sonra da hacimler arasında enerji harcamalarının dengelenmesi veya minimuma indirilmesi enerjinin korunması öncelikli bir hal almıştır. Bu hedefe yönelik olarak, bu çalışma binaların yapım kademlerinde, enerji açısından etkili tasarımlarına ilişkin alınacak önlemlerle yıllık ısıtma, soğutma ve

toplam enerji harcamalarının azaltılması ve binaları oluşturan hacimler arası enerji harcamalarının dengelenmesi ele alınmıştır. Literatürde binalarda enerji performansını artırmak için yapılan birçok çalışma mevcut olup binalarda ısı enerji depolayan faz değişim malzemelerin kullanılması ülkemizde öncelikli araştırma alanları kapsamına girmekte olup bu tez çalışmasının hem ulusal ve uluslararası literatüre hem de sektöre katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Faz değişim malzemelerinin en etkili bir şekilde kullanılması ülkemiz ekonomisine katkıda bulunacaktır.

1.1. CO₂ Gazının Dünyamıza Etkisi

Karbondiyoksit (CO₂), doğal karbon döngüsünün temel bileşenlerinden biri olup atmosferde eser miktarda bulunan renksiz ve kokusuz bir gazdır. Doğal süreçler neticesindeki solunum, volkanik faaliyetler ve okyanus-atmosfer etkileşimleri yoluyla atmosfere salınan CO₂, fotosentez yoluyla bitkiler tarafından tüketilerek ekosistem içerisinde dengeli bir döngü halinde varlığını sürdürmektedir (IPCC, 2021). Ancak sanayi devriminden itibaren insan faaliyetlerinin artmasıyla birlikte bu doğal denge önemli ölçüde bozulmuştur.

Fosil yakıtların enerji üretimi, sanayi ve ulaşım sektörlerinde yoğun biçimde kullanılması, atmosferdeki CO₂ konsantrasyonunun hızla artmasına neden olmuştur. Sanayi öncesi dönemde yaklaşık 280 ppm seviyesinde olan atmosferik CO₂ yoğunluğu, günümüzde 420 ppm değerinin üzerine çıkmıştır (NOAA, 2023). Karbondiyoksitin sera gazı özelliği nedeniyle bu artış, yeryüzünden yayılan uzun dalga boylu kızılötesi radyasyonun atmosferde tutulmasına ve küresel sıcaklıkların yükselmesine yol açmaktadır.

Atmosferde artan CO₂ miktarı, küresel iklim değişikliğinin başlıca itici güçlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Küresel ortalama sıcaklıklardaki artış; buzulların erimesi, deniz seviyelerinin yükselmesi ve aşırı hava olaylarının sıklık ve şiddetinin artması gibi çevresel sorunları beraberinde getirmektedir (IPCC, 2021). Bununla birlikte yağış rejimlerindeki değişimler, tarımsal üretim ve su kaynakları üzerinde olumsuz etkiler oluşturarak ekosistemlerin dengesini tehdit etmektedir.

CO₂ emisyonlarının artışı yalnızca atmosfer ve iklim sistemi üzerinde değil, okyanus ekosistemleri üzerinde de ciddi etkilere sahiptir. Atmosferdeki fazla CO₂'nin okyanuslar tarafından absorbe edilmesi, okyanus asitlenmesine neden olmakta ve bu durum deniz canlılarının özellikle de kalsiyum karbonat yapıları organizmaların yaşam koşullarını olumsuz etkilemektedir (Doney vd., 2009). Okyanus asitlenmesi, deniz biyolojik çeşitliliği açısından küresel ölçekte önemli bir risk oluşturmaktadır.

Artan CO₂ emisyonlarının dolaylı etkileri insan sağlığı ve sosyoekonomik yapı üzerinde de hissedilmektedir. İklim değişikliğine bağlı sıcaklık artışları, hava kalitesindeki bozulmalar ve doğal afetlerin artışı, toplum sağlığını ve ekonomik sürdürülebilirliği olumsuz yönde etkilemektedir (WHO, 2018). Bu bağlamda, CO₂ emisyonlarının azaltılması yalnızca çevresel bir zorunluluk değil, aynı zamanda ekonomik ve toplumsal refahın korunması açısından da kritik bir gerekliliktir.

Bu nedenle, enerji verimliliğinin artırılması ve CO₂ salımının azaltılmasına yönelik mühendislik çözümleri büyük önem taşımaktadır. Özellikle bina sektörü, toplam enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları içerisindeki yüksek payı nedeniyle öncelikli müdahale alanlarından biri olarak öne çıkmaktadır (IEA, 2021). Bina kabuğunda enerji depolama ve ısııl performansı iyileştirmeye yönelik uygulamalar, CO₂ emisyonlarının azaltılmasında etkili ve sürdürülebilir yaklaşımlar arasında yer almaktadır.

1.2. Bina Kabuğunda Enerji İhtiyacını ve CO₂ Salımını Azaltmanın Yöntemleri

Küresel ölçekte enerji tüketiminin ve buna bağlı karbondioksit (CO₂) salımlarının önemli bir bölümü bina sektöründen kaynaklanmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı verilerine göre, binalar dünya genelindeki toplam enerji tüketiminin yaklaşık % 35–40'ını oluşturmakta ve bu tüketim, büyük ölçüde ısıtma ve soğutma amaçlı enerji kullanımından kaynaklanmaktadır (IEA, 2021). Bu durum, bina enerji performansının iyileştirilmesini ve CO₂ salımlarının azaltılmasını sürdürülebilir kalkınma hedefleri açısından kritik hale getirmektedir.

Bina kabuğu; iç ve dış ortam arasındaki ısı, hava ve nem transferini kontrol eden temel yapı bileşeni olup, bina enerji ihtiyacını doğrudan etkileyen en önemli unsurlardan biridir. Duvarlar, çatı, döşemeler, pencere ve kapılardan oluşan bina kabuğunun yetersiz ısııl performansı, yüksek ısı kayıplarına ve kazançlarına neden olmakta; bu durum mekanik ısıtma ve soğutma sistemlerine olan bağımlılığı artırarak enerji tüketimini ve dolayısıyla CO₂ salımını yükseltmektedir (ASHRAE, 2017).

Bina kabuğunda enerji ihtiyacını ve CO₂ salımını azaltmaya yönelik yöntemlerin başında yüksek performanslı ısııl yalıtım uygulamaları gelmektedir. Isıl yalıtım malzemelerinin uygun kalınlık ve özelliklerde kullanılması, ısı geçişlerini sınırlandırarak bina ısıtma ve soğutma yüklerini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bunun yanı sıra, ısııl köprülerin minimize edilmesi ve hava sızdırmazlığının artırılması, bina kabuğunun enerji etkinliğini artıran temel önlemler arasında yer almaktadır (Ürge-Vorsatz vd., 2015).

Enerji ihtiyacını azaltmaya yönelik bir diğer önemli yaklaşım, pasif bina tasarım stratejilerinin uygulanmasıdır. Güneş kazançlarının kontrol edilmesi, gölgeleme

elemanlarının kullanımı, yüksek yansıtıcı çatı kaplamaları ve doğal havalandırma çözümleri, iç ortam konfor koşullarını iyileştirirken enerji tüketimini azaltmaktadır. Bu stratejiler, özellikle sıcak iklim bölgelerinde soğutma enerjisi ihtiyacının düşürülmesinde etkili olmaktadır (Santamouris, 2016).

Son yıllarda bina kabuğunda enerji depolama kapasitesini artırmaya yönelik yenilikçi malzeme ve sistemler de enerji ihtiyacının ve CO₂ salımının azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Faz değiştiren malzemelerin (FDM) bina kabuğu elemanlarına entegre edilmesi, iç ortam sıcaklık salınımlarını azaltarak ısıtma ve soğutma yüklerini dengelemekte ve bina enerji performansını iyileştirmektedir. Bu tür uygulamalar, enerji tüketiminin azalması yoluyla dolaylı CO₂ salımlarının düşürülmesine katkı sağlamaktadır (Cabeza vd., 2011).

Sonuç olarak, bina kabuğunun ısı ve enerji performansını artırmaya yönelik tasarım ve malzeme çözümleri, bina enerji ihtiyacını azaltarak CO₂ salımının sınırlandırılmasında kilit bir rol üstlenmektedir. Bu nedenle, bina kabuğunda uygulanacak yenilikçi mühendislik yaklaşımlarının geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, sürdürülebilir ve düşük karbonlu yapı tasarımının temel bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

1.2.1. Pasif Ev Tasarım Stratejileri

Yüksek Performanslı Isı Yalıtımı:

- Dış duvar, çatı ve döşemelerde yüksek ısı yalıtım kalınlıkları
- Isı geçiş katsayısının (U-değeri) minimize edilmesi
- Amaç: Isı kayıplarını ve kazançlarını sınırlandırmak

Isıtma ve soğutma enerjisi ihtiyacını %60–80 oranında azaltabilir.

Isıl Köprülerin Minimize Edilmesi:

- Yapı birleşim noktalarında (kolon-kiriş, pencere kenarları vb.) ısı köprülerinin önlenmesi
- Sürekli yalıtım katmanı kullanımı
- Isı kayıpları ve yoğuşma riskleri önemli ölçüde azaltılır.

Yüksek Hava Sızdırmazlığı:

- Hava kaçaklarının minimuma indirilmesi
- Blower Door Testi ile kontrol ($n_{50} \leq 0.6 \text{ h}^{-1}$)

Kontrolsüz hava giriş-çıkışları önlenir.

1.2.2.Yüksek Performanslı Pencereleler

- Üç camlı (Triple glazing) pencere sistemleri
- Düşük emisyonlu (Low-E) kaplamalar
- Argon/Krypton gaz dolgusu

Güneş kazancı sağlanırken ısı kaybı minimize edilir.

1.2.3. Bina Yönlenmesi ve Kompakt Tasarım

- Güney cepheye maksimum pencere alanı
- Kuzey cephede sınırlı açıklıklar
- Kompakt bina formu (A/V oranı düşük)

Doğal güneş kazancı maksimuma çıkarılır.

1.2.4. Pasif Güneş Kazançları

- Kışın güneş kazançlarının içeri alınması
- Yazın gölgeleme ile aşırı ısınmanın önlenmesi
- Saçaklar, panjurlar, brise-soleil kullanımı

1.2.5. Isıl Kütle ve Enerji Depolama

- Beton, tuğla gibi yüksek ısıl kütleli malzemeler
- Faz Değiştiren Malzemeler (FDM / PCM)

İç ortam sıcaklık dalgalanmaları azaltılır.

1.2.6. Doğal Havalandırma

- Çapraz havalandırma
- Baca etkisi (stack effect)
- Gece havalandırması

Soğutma ihtiyacı azaltılır.

1.2.7. Isı Geri Kazanımlı Mekanik Havalandırma (MVHR)

- % 75–90 verimli ısı geri kazanımı
- Taze hava sağlanırken ısı kaybı minimize edilir

Pasif evlerin temel bileşenidir.

1.2.8. Yüksek Yansıtıcılı ve Yeşil Çatılar

- Açık renkli, yansıtıcı çatı kaplamaları
- Yeşil çatı sistemleri

Yaz soğutma yükleri düşürülür.

2. BİNA KABUĞUNDA ISIL ENERJİ DEPOLAMA

Bina kabuğunda ısı depolama, yapı elemanlarının çevresel kaynaklardan veya iç mekândan aldıkları ısıyı belirli bir süre boyunca bünyelerinde tutarak, ihtiyaç duyulan zamanlarda kontrollü bir şekilde geri salmaları prensibine dayanan bir enerji yönetimi yaklaşımıdır. Bu kavram, bina enerji performansının iyileştirilmesi ve ısıtma–soğutma enerji ihtiyacının azaltılması amacıyla pasif enerji verimliliği stratejileri kapsamında değerlendirilmektedir (Dincer ve Rosen, 2011).

Bina kabuğu; dış duvarlar, çatı, döşemeler, pencere ve kapılardan oluşan ve iç ortam ile dış çevre arasındaki ısı transferini düzenleyen temel yapı bileşenidir. Bu yapı elemanlarının ısı depolama kapasitesinin artırılması, iç ortam sıcaklık dalgalanmalarının azaltılmasına ve termal konforun iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Isı depolama özelliği zayıf olan bina kabukları, dış ortam sıcaklık değişimlerine hızlı tepki vererek iç ortamda ani sıcaklık dalgalanmalarına neden olmaktadır (Zalba vd., 2003).

Bina kabuğunda ısı depolama, temel olarak duyulur ısı depolama ve gizli ısı depolama olmak üzere iki ana mekanizma ile gerçekleşmektedir. Duyulur ısı depolama, yapı malzemesinin sıcaklık değişimiyle orantılı olarak ısı enerjisini depolaması esasına dayanmakta olup, beton, tuğla ve taş gibi yüksek ısıl kütleyle sahip malzemeler bu kapsamda değerlendirilmektedir. Gizli ısı depolama ise faz değiştiren malzemeler (FDM) aracılığıyla gerçekleşmekte ve malzemenin faz değişimi sırasında büyük miktarda ısının sabit sıcaklıkta depolanabilmesini mümkün kılmaktadır (Cabeza vd., 2011).

Bina kabuğunda ısı depolama uygulamalarının temel amacı, gün içindeki ve mevsimsel sıcaklık değişimlerini dengeleyerek bina enerji yüklerini azaltmaktır. Gündüz saatlerinde güneş ışıınımı ve dış hava sıcaklığı nedeniyle oluşan ısı kazançları, bina kabuğu tarafından depolanmakta; gece saatlerinde ise bu enerji kontrollü şekilde iç ortama geri salınarak ısıtma ihtiyacının azalmasına katkı sağlamaktadır. Benzer şekilde, yaz aylarında depolanan ısının geceleri dış ortama atılmasıyla iç ortam sıcaklıkları daha kararlı hale getirilebilmektedir (Tyagi ve Buddhi, 2007).

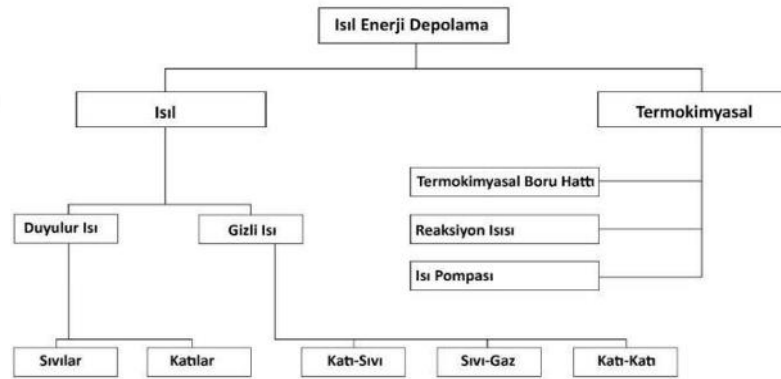
Isı depolama yeteneğine sahip bina kabukları, yalnızca enerji tüketimini azaltmakla kalmamakta, aynı zamanda mekanik ısıtma ve soğutma sistemlerinin çalışma sürelerini kısaltarak bu sistemlerin verimliliğini artırmaktadır. Bu durum, fosil yakıt kullanımının ve buna bağlı CO₂ emisyonlarının düşürülmesine dolaylı katkı sağlamaktadır (Ürge-Vorsatz vd., 2015). Bu nedenle, bina kabuğunda ısı depolama kavramı, sürdürülebilir bina tasarımı ve düşük karbonlu yapılaşma hedefleri açısından stratejik bir öneme sahiptir.

Sonuç olarak bina kabuğunda ısı depolama; pasif bina tasarım ilkeleriyle uyumlu, enerji verimliliğini artıran ve çevresel etkileri azaltan yenilikçi bir yaklaşımdır. Özellikle faz değiştiren malzemeler gibi ileri düzey ısı depolama çözümlerinin bina kabuğuna entegrasyonu, geleceğin enerji etkin yapı tasarımlarında önemli bir rol oynamaktadır.

2.1. Isıl Enerji Depolama Yöntemleri

Isı enerjisi bir maddeyi oluşturan atom veya moleküllerin titreşimiyle oluşur. Atom veya moleküllerin kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamına eşittir. Isı enerjisi maddenin iç enerjisinin değişimiyle duyulur ısı, gizli ısı, tepkime ısı veya bunların hepsinin toplamı olarak depolanır (Yılmazoğlu, 2010).

Isıl enerji depolama sistemlerinin sınıflandırılması Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Isıl enerji depolama yöntemleri (Sharma vd., 2009).

2.1.1. Duyulur Isıl Enerji Depolama

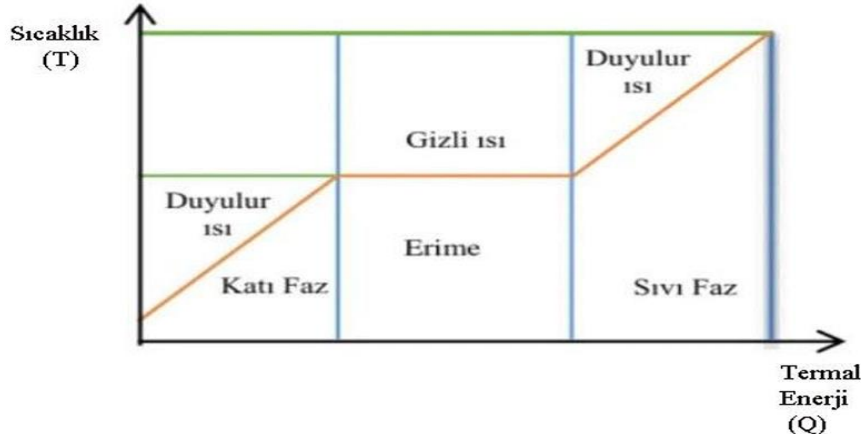
Duyulur ısı, faz değişimi olmadığı zamanlarda maddenin sıcaklığını değiştirmek için gereken ısı miktarıdır. Maddenin sıcaklığı değişir fakat fazı değişmemektedir (Konuklu ve Paksoy, 2011). Duyulur ısı depolama, katı ve sıvı fazda bulunan maddelerin ısıtılarak sıcaklığının artırılması sırasında ortaya çıkan enerjinin depolanma yöntemidir (Taheri ve Sharma, 2015).

2.1.2. Gizli Isıl Enerji Depolama

Gizli ısı, maddenin faz değişimi esnasında ortamdan aldığı veya verdiği ısıdır (Konuklu, 2008). Uygun sıcaklık değerleri içerisinde malzemenin faz değişimiyle oluşan gizli ısı depolanabilmektedir. Gizli ısı depolamak için belirli sıcaklık değerleri içerisinde buharlaşma, ergime ve FDM’lerden yararlanılır (Bayram, 2021).

Gizli ısının depolanması katı-katı, katı-sıvı, katı-gaz, sıvı-gaz veya tam tersi faz değişiminin gerçekleştiği durumlarda görülmektedir. Katı-sıvı faz değişimi esnasında katı madde erime sıcaklığına ulaşana kadar sıcaklığı yükselir. Erime sıcaklığına ulaştığında sabit kalır fakat tamamen erimesi için moleküler değişimin gerçekleşmesi gerekir. Bu sebeple ısı kaynağından ısı emmeye devam eder. Emilen bu ısı erime entalpisi, katı-sıvı faz değişim entalpisi, füzyon ısısı, füzyon entalpisi olarak adlandırılır (Bayram, 2021).

Gizli ısı depolama yönteminin ısı depolama kapasitesi duyulur ısı depolama yöntemine göre daha yüksektir bu sebeple daha az ısı depolama materyali kullanılarak depo hacminin küçültülmesine imkân sağlar. FDM'lerin faz değişim sıcaklıkları sabit sıcaklıkta ısı depolama ve geri kazanımı için uygundur. Sabit sıcaklıkta ısı ihtiyacı olan uygulamalarda kullanılabilir (Öztürk, 2005). Özellikle 18-30°C aralığında çalışan enerji depolama uygulamaları için uygun bir malzemedir. Bu sıcaklık aralığı termal konfor için gerekli değerleri sağlamakta ve FDM'yi bina kullanımları için elverişli hale getirmektedir (Gümüş, 2019). Şekil 2'de gizli ısı ve duyulur ısının karşılaştırma grafiği verilmiştir.



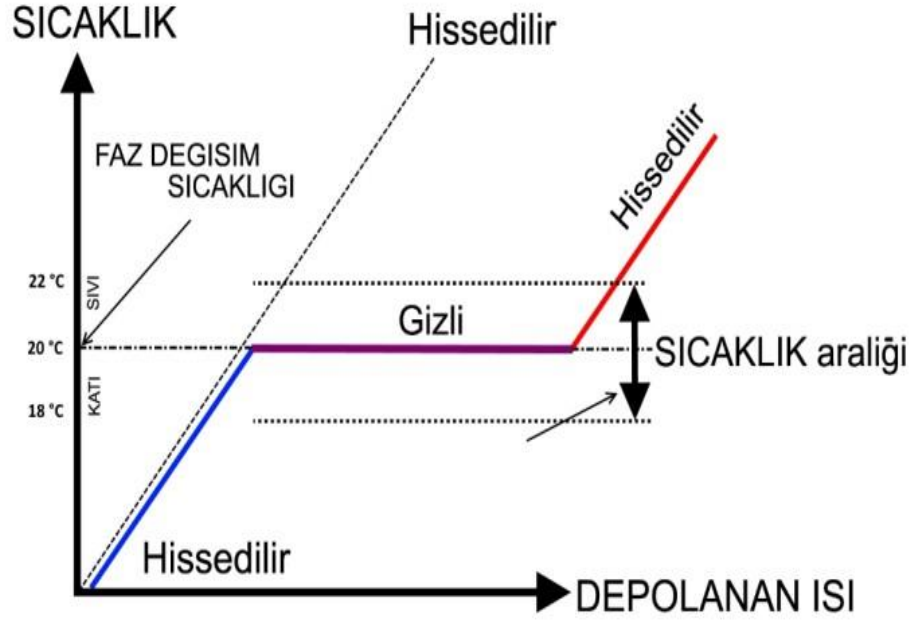
Şekil 2. Gizli ısı ve duyulur ısı karşılaştırma grafiği (Bayram, 2021).

2.2. Faz Değiştiren Malzemeler

Faz Değiştiren Malzeme (FDM), belirli bir sıcaklık aralığında faz değişimi (genellikle katı-sıvı) sırasında büyük miktarda ısıyı sabit sıcaklıkta depolayabilen ve geri verebilen malzemelerdir. Bu özellikleri nedeniyle FDM'ler, ısı depolama ve enerji verimliliği uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. (Zalba vd., 2003; Sharma vd., 2009; Kenisarin ve Mahkamov, 2007)

FDM'lerin temel çalışma prensibi, gizli ısı depolama mekanizmasına dayanır. Geleneksel yapı malzemelerinde ısı depolama, malzemenin sıcaklık artışıyla gerçekleşen duyulur ısı yoluyla sağlanırken; FDM'lerde enerji, faz değişimi sırasında depolandığı için

birim hacim başına çok daha yüksek enerji yoğunluğu elde edilmektedir (Tyagi ve Buddhi, 2007). Aşağıdaki şekilde ifade edildiği gibi belirtilebilir.



Şekil 3. Faz değişimi sırasında hissedilir ısı ve gizli ısı ile sıcaklığın kontrolü (Zalba vd., 2003).

Bir FDM'nin yapı uygulamalarında kullanılabilmesi için aşağıdaki özelliklere sahip olması beklenir:

- Uygun faz değişim sıcaklığı
- Yüksek gizli ısı depolama kapasitesi
- Kimyasal ve termal kararlılık
- Tekrarlı faz değişimlerinde performans kaybının olmaması
- Düşük hacim değişimi ve güvenli kullanım

Bu özellikler, FDM'nin özellikle bina iç ortam sıcaklık aralığında etkin çalışmasını sağlamaktadır (Cabeza vd., 2011).

2.1.1. Faz Değiştirilen Malzemelerin Sınıflandırılması

a-) Kimyasal Yapılarına Göre Sınıflandırma:

Organik Faz Değiştiren Malzemeler:

Organik FDM'ler genellikle karbon bazlı bileşiklerden oluşmakta olup, yapı uygulamalarında en yaygın kullanılan FDM grubunu oluşturmaktadır (Zalba vd., 2003; Tyagi ve Buddhi, 2007).

Başlıca türleri:

- Parafinler
- Yağ asitleri

Avantajları:

- Kimyasal olarak kararlı olmaları
- Faz ayrışması göstermemeleri
- Korozyona neden olmamaları

Dezavantajları:

- Düşük ısı iletkenlik
- Yanıcılık riski
- Görece düşük gizli ısı değerleri

İnorganik Faz Değiştiren Malzemeler:

İnorganik FDM'ler çoğunlukla tuz hidratları ve bazı metal alaşımlarından oluşmaktadır (Cabeza vd., 2011).

Başlıca türleri:

- Tuz hidratları
- Metal bazlı FDM'ler

Avantajları:

- Yüksek gizli ısı depolama kapasitesi
- Görece yüksek ısı iletkenlik

Dezavantajları:

- Faz ayrışması (segregasyon)
- Aşırı soğuma (supercooling) eğilimi
- Korozyon riski

Ötektik Faz Değiştiren Malzemeler:

Ötektik FDM'ler, iki veya daha fazla bileşenin belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen ve tek bir sıcaklıkta faz değişimi gösteren malzemelerdir. (Zalba vd., 2003)

Başlıca türleri:

- Organik–organik ötektikler
- Organik–inorganik ötektikler

Avantajları:

- Keskin faz değişim sıcaklığı
- Tasarlanabilir erime sıcaklığı

Dezavantajları:

- Üretim süreçlerinin karmaşıklığı
- Görece yüksek maliyet

b-)Faz Değişim Türlerine Göre Sınıflandırma;

Katı-Sıvı Faz Değiştiren Malzemeler:

Bina uygulamalarında en yaygın kullanılan FDM türüdür. Katı hâlden sıvı hâle geçiş sırasında yüksek miktarda gizli ısı depolanır.

Katı-Katı Faz Değiştiren Malzemeler:

Faz değişimi sırasında makroskobik hacim değişimi olmaması avantaj sağlar.

Dezavantajı:

- Gizli ısı depolama kapasitesinin görece düşük olması

Sıvı-Gaz Faz Değiştiren Malzemeler:

Yüksek gizli ısıya sahip olmalarına rağmen hacim değişimi ve güvenlik sorunları nedeniyle bina uygulamalarında tercih edilmemektedir (Tyagi ve Buddhi, 2007).

c-) Uygulama ve Entegrasyon Yöntemine Göre Sınıflandırma:

Doğrudan Entegre Edilen FDM'ler:

FDM, yapı malzemesinin bünyesine doğrudan karıştırılır.

Örnek:

- Alçı levha içerisine FDM eklenmesi
- Beton içine FDM eklenmesi

Kapsüllenmiş Faz Değiştiren Malzemeler:

FDM, dış ortamdan izole edilerek kapsüller içinde muhafaza edilir.

- Mikrokapsüllenmiş FDM
- Makrokapsüllenmiş FDM

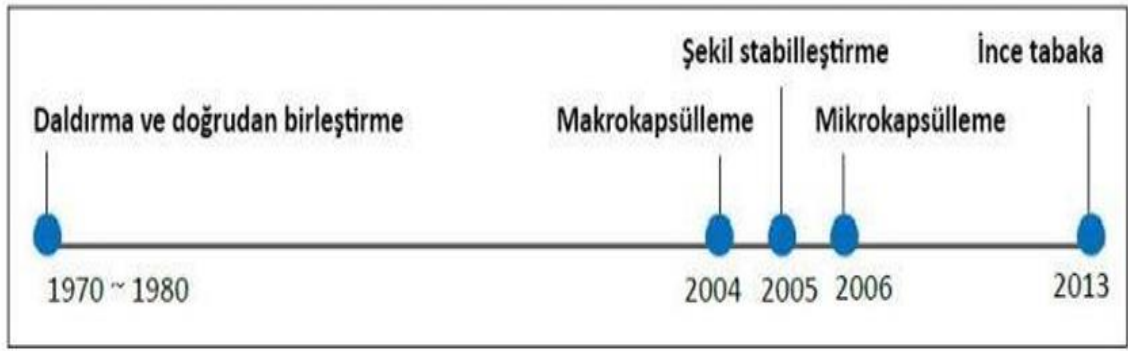
Bina kabuğu ve çatı sistemlerinde en güvenli yöntemdir.

Modüler ve Panelli Sistemler:

FDM içeren paneller, bina kabuğuna sonradan entegre edilebilir (Cabeza vd., 2011).

2.3. FDM'lerin Bina Kabuğunda Uygulanma Teknikleri

FDM'ler bina kabuğundaki bina dış katmanlarında tek başına kullanılabildiği gibi bina dış katmanlarıyla da birlikte kullanılabilir. Bina kabuğundaki katmanlarında birlikte kullanımını sağlayan üç teknik vardır. Bunlar doğrudan birleştirme, daldırma ve kapsüllemedir.



Şekil 4. Bina elemanlarında kullanılan FDM birleştirme yöntemlerinin araştırma ve geliştirme zaman çizelgesi (Lee, 2014).

2.3.1. Daldırma Tekniği

Alçı, tuğla veya beton gibi yapı malzemelerinin erimiş sıvı fazdaki FDM içerisine daldırma yöntemidir. Bu yapı elemanlarındaki gözenekler FDM'yi içerisinde tutar (Lee, 2014). Daldırma yönteminin avantajı herhangi bir yapı malzemesine uygulanabilir olması ve maliyetinin az olmasıdır. Dezavantajı ise uzun süreli kullanımda sızıntı veya akma problemi oluşturma ihtimalinin bulunmasıdır. Bunu engellemek için gözenek yapısı yoğun olan malzemelerin FDM ile birleştirilmesi sağlanabilir ve FDM özel ince silikalara veya polimerik taşıyıcılara emdirilebilir (Salyer vd.,1985).

2.3.2. Doğrudan Birleştirme Tekniği

Doğrudan birleştirme yönteminde sıvı veya toz haldeki FDM alçı, beton veya sıva gibi yapı malzemeleriyle doğrudan karıştırılır. Uygulama sırasında az ekipman kullanıldığı için ekonomiktir (Lee, 2014).

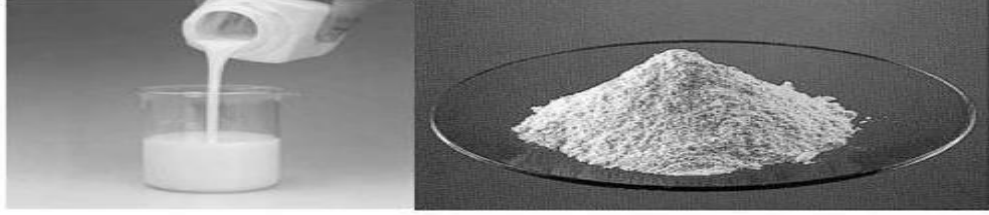
2.3.3. Kapsülleme Tekniği

FDM'nin farklı tipte kapsüllerin içine konulması işlemidir. Mikrokapsülleme ve makrokapsülleme olarak ikiye ayrılır. 1 mm'den büyük çapa sahip olanlar makrokapsül, 1mm'den küçük çapa sahip olanlar mikrokapsül olarak isimlendirilir (Al Shannaq vd., 2015). Son zamanlarda ortaya çıkan bir diğer yöntem ise nanokapsüllemedir. Bu yöntemle üretilen kapsüllerin çapı 1 μm 'den (mikrometre) daha küçüktür. Nanokapsül yöntemi FDM'nin sızma problemini engellemeyi, ısı transferini artırmayı ve termofiziksel özelliklerini iyileştirmeyi amaçlar (Nazir vd., 2019).

2.3.3.1. Mikrokapsülleme

Bu yöntemde FDM parçacıkları bir kaplama veya kabuk ile çevrelenir. Yaygın olarak kullanılan kabuk malzemeleri üre-formaldehit reçinesi, melamin-formaldehit

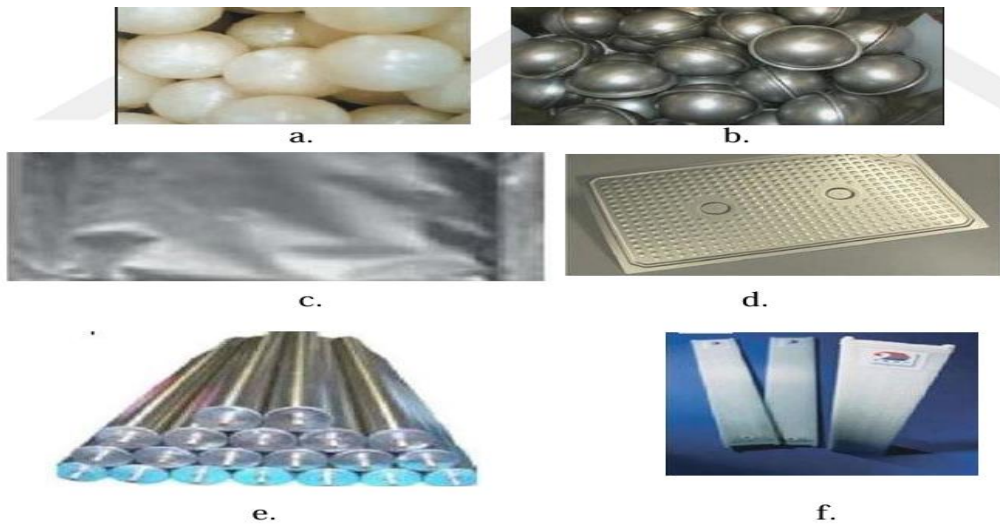
reçinesi ve poliüretanlardır. Mikrokapsülleme yönteminde ısı transfer alanının fazla olması, dış ortamla etkileşiminin azaltılması ve faz geçişi esnasında kontrollü hacim değişikliği sağlaması sebebiyle avantajlıdır (Nazir vd., 2019). Dezavantajı ise ısı transfer hızının fazla olmasından dolayı hızlı eriyip katılaşarak içinde bulunduğu yapı malzemesinin de kısmen eriyip katılaşmasına yol açmasıdır. Bu sebeple eşit olmayan bir karışım oranı oluşabilir (Lee, 2014). Şekil 5’de mikrokapsüllenmiş parafin görülmektedir.



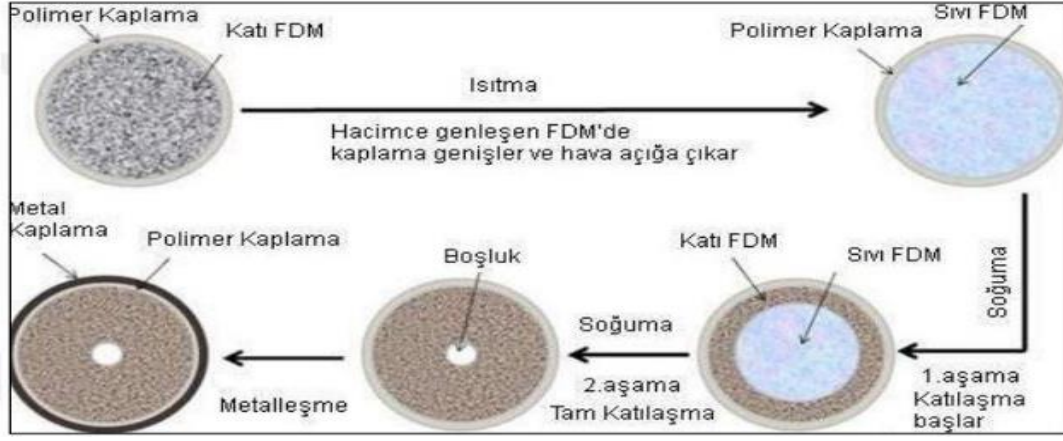
Şekil 5. BASF firması tarafından üretilen sıvı halde ve kurutulmuş toz halinde mikrokapsüllenmiş parafin (fotoğraf: BASF), (Mehling ve Cabeza, 2008).

2.3.3.2. Makrokapsülleme

Makrokapsülleme, faz değiştiren malzemelerin (FDM) belirli geometrik kaplar içerisinde muhafaza edilerek dış çevre koşullarından izole edilmesi esasına dayanan bir kapsülleme tekniğidir. Bu yöntemde FDM, boru, panel, küresel veya prizmatik formdaki kapsüller içerisine yerleştirilerek sızıntı, yanıcılık ve mekanik dayanım gibi sorunlar minimize edilmektedir. Makrokapsülleme, özellikle bina uygulamalarında FDM’lerin güvenli, uzun ömürlü ve etkin bir şekilde kullanılmasını mümkün kılmaktadır (Zalba vd., 2003). Makrokapsülleme Şekil 6’da gösterildiği gibi FDM’nin makrokapsülleme uygulamaları belirtilmiştir



Şekil 6. Metal top (a), Küre (b), Alüminyum paket (c), Alüminyum panel (d), Tüp (e), Levha (f) İçerisinde makrokapsüllenmiş FDM’ler (Rathore, 2022).



Şekil 7. FDM'lerin kapsülasyon yönteminin akış diyagramı (Coşkuner, 2018).

Bu yöntemin avantajı FDM'lerin sızıntı problemini engelleyebilmesidir (D. Zhou vd., 2012). Dezavantajı ise kapsül boyunun büyük olmasından dolayı çekirdek-çeper arasında mesafenin artarak sıcaklık farklılıklarına yol açmasıdır. Bu sebeple Şekil 7'de görüldüğü gibi çekirdek kısmı çeperden önce sıvı faza geçebilir ve homojen olmayan faz geçişi durumu ortaya çıkabilir (Lee, 2014). Makrokapsülleme süreci genel olarak malzeme seçimi, kapsül tasarımı, dolum işlemi ve sızdırmazlık sağlanması olmak üzere dört temel aşamadan oluşmaktadır.

Faz Değiştiren Malzemenin Seçilmesi;

Makrokapsülleme işlemine başlamadan önce, uygulama amacına uygun faz değiştiren malzeme seçilmelidir. Bina uygulamalarında genellikle organik FDM'ler (parafinler ve yağ asitleri) tercih edilmektedir. Seçilen FDM'nin faz değişim sıcaklığının bina iç ortam konfor aralığına (yaklaşık 20–30 °C) uygun olması gerekmektedir. Ayrıca malzemenin yüksek gizli ısı kapasitesine ve uzun süreli termal kararlılığa sahip olması önemlidir (Cabeza vd., 2011).

Kapsül Malzemesi ve Geometrisinin Belirlenmesi;

Makrokapsülleme işleminde kullanılan kapsül malzemesi, sistem performansını doğrudan etkileyen kritik bir parametredir. Kapsüller genellikle şu malzemelerden üretilmektedir:

- *Metal kapsüller (alüminyum, çelik):* Yüksek ısıl iletkenlik sağlar ancak korozyon ve maliyet dezavantajı vardır.
- *Polimer kapsüller (HDPE, polipropilen):* Hafif, korozyona dayanıklı ve düşük maliyetlidir.
- *Kompozit kapsüller:* Mekanik dayanım ve ısıl performansı dengeleyen çözümler sunar.

Kapsül geometrisi ise uygulama alanına göre boru, panel, küre veya prizmatik formda tasarlanabilmektedir. Çatı ve duvar uygulamalarında genellikle panel ve boru tipi kapsüller tercih edilmektedir (Tyagi ve Buddhi, 2007).

FDM'nin Kapsül İçerisine Doldurulması;

Makrokapsülleme işleminin bir sonraki aşamasında, seçilen FDM kapsül içerisine doldurulmaktadır. Bu işlem genellikle FDM'nin erimiş (sıvı) fazda kapsül içine aktarılmasıyla gerçekleştirilir. Dolum sırasında aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir:

- Kapsül içerisinde hava boşluğu bırakılmaması
- Faz değişimi sırasında oluşabilecek hacim genişlemesine izin verecek toleransın sağlanması
- Homojen dolum yapılması

Dolum işlemi tamamlandıktan sonra kapsül ağzı, kaynak, yapıştırma veya mekanik kapatma yöntemleriyle sızdırmaz hale getirilmektedir (Zhou vd., 2012).

Sızdırmazlık ve Dayanım Testleri;

Makrokapsüllenmiş FDM sistemlerinin bina uygulamalarında güvenli şekilde kullanılabilmesi için sızdırmazlık ve mekanik dayanım testlerinin yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda kapsüller:

- Termal çevrim testlerine
- Mekanik darbe ve basınç testlerine
- Uzun süreli faz değişim döngülerine

tabi tutulmaktadır. Bu testler, kapsülün tekrarlı faz değişimleri sırasında deformasyona uğramadan ve sızıntı oluşturmada çalışabildiğini doğrulamak amacıyla yapılmaktadır (Al-Saadi ve Zhai, 2013).

Avantajlar;

Makrokapsüllenmiş FDM sistemlerinin başlıca avantajları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

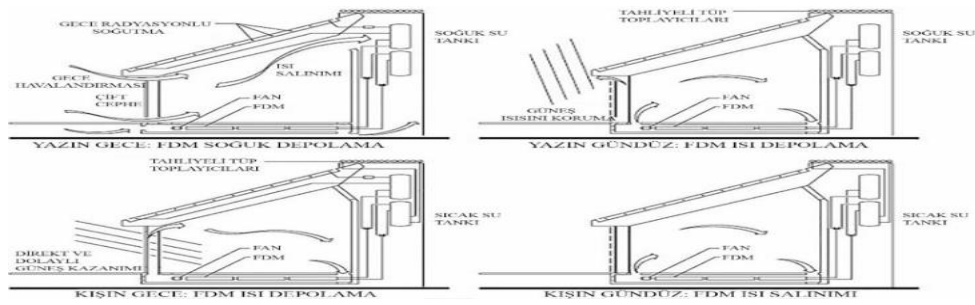
- FDM'nin güvenli ve kontrollü kullanımı
- Mekanik dayanımın artırılması
- Sızıntı ve yangın riskinin azaltılması
- Bina kabuğuna kolay entegrasyon
- Uzun süreli ve kararlı ısı performans

Bu avantajlar sayesinde makrokapsülleme yöntemi, özellikle bina çatı sistemleri gibi dış çevre koşullarına maruz kalan uygulamalarda öne çıkmaktadır.

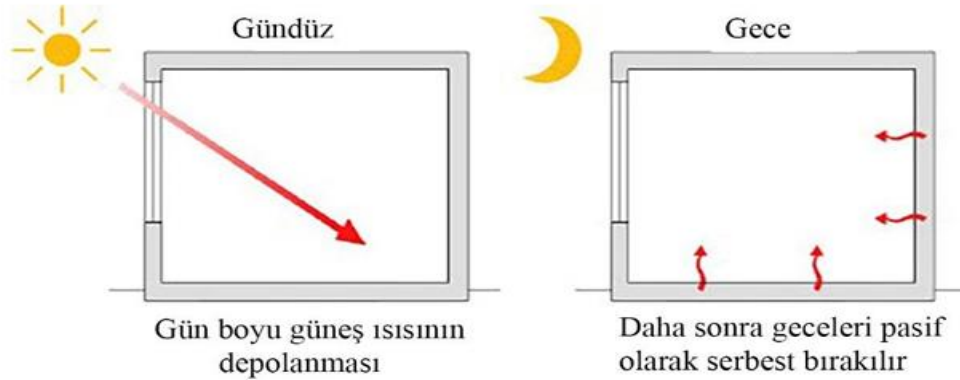
2.4. Bina Kabuğunda Dış Katmanlarda FDM Kullanım Uygulamaları

Yapı yüzeyindeki FDM uygulamalarında çoğunlukla pasif sistemler tercih edilmektedir. Aktif sistemler ise daha çok depolama ünitelerinde ve binaların ısıtma sistemlerini içeren diğer bölümlerinde tercih edilir (Taheri ve Sharma, 2015).

Aktif sistemler içerisinde FDM gece havalandırma yapılmasına imkân sağlanan havalandırma stratejileri ve ısı eşanjörlerinin kullanıldığı hidronik sistemler ile etkinleştirilir. Pasif sistem ise mekanik sistemler olmadan doğrudan veya dolaylı güneş ısısisının kullanıldığı sistemlerdir. Faz değişimleri iç mekândaki sıcaklık değişimi ile başlar (Anayurt, 2021). Şekil 8 ve Şekil 9’da aktif ve pasif uygulamaları gösterilmiştir.



Şekil 8. Aktif sistemlerde hava ve suyun termal değişimli bileşen olarak kullanılması (Rodriguez-Ubinas vd., 2012) (Merve Kılınç tarafından revize oluşturulmuştur.)



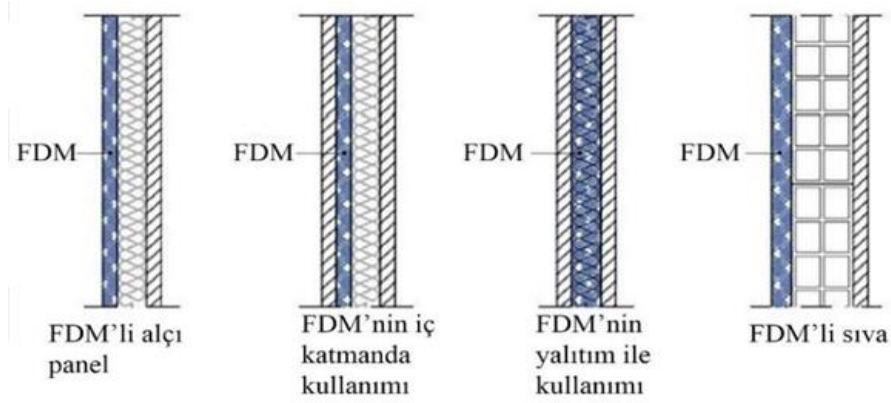
Şekil 9. Pasif sistemlerde güneş kazanç sistemi (Casini, 2016).

2.4.1. Bina Kabuğunun Duvardaki FDM Kullanım Uygulamaları

FDM’lerin bina duvarlarında kullanılması ile gizli ısı kapasitesi yüksek duvarlar elde edilir. Böylelikle iç ortam sıcaklık dalgalanmalarında, ısıtma ve soğutma yüklerinde azalma meydana gelir (Cui vd., 2015).

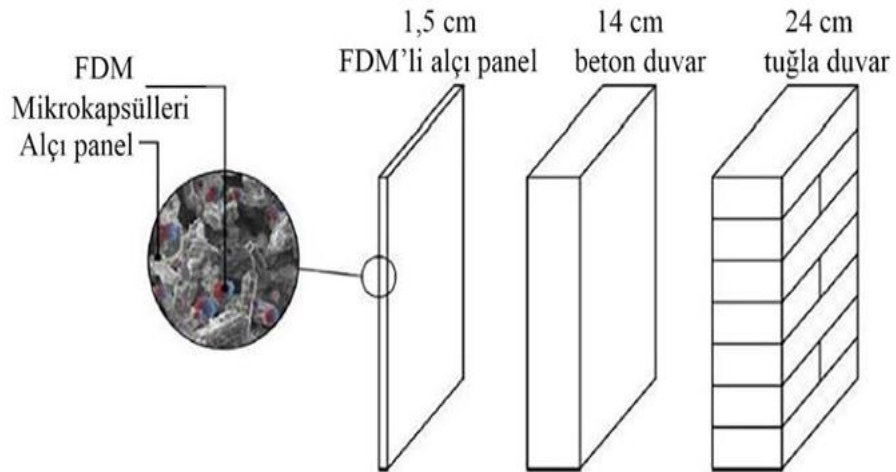
Şekil 10’da FDM’nin iç duvarda kullanım örnekleri gösterilmiştir. Mikrokapsüllenmiş FDM’ler kolay uygulama, uygun ısı transferi ve kapsülleme

tahribatına karşı korumaya gerek olmaması gibi avantajlara sahiptir. Alçı panellere entegre edilen mikrokapsüllenmiş FDM'lerin uygun çalışma sıcaklıkları 21°C, 23°C ve 26°C dir. FDM'nin alçı panelde maksimum ağırlık oranı ise % 30'dur. FDM'lerin verimlilikleri birleştirme yöntemi, duvar oryantasyonu, iklim koşulları, doğrudan güneş kazanımları, yüzey rengi, havalandırma oranı, seçilen FDM cinsi, faz değişiminin gerçekleştiği sıcaklık aralığı, birim alan başına düşen gizli ısı kapasitesi gibi özelliklere bağlıdır (Casini, 2016).



Şekil 10. FDM'nin iç duvarda kullanım örnekleri (Casini, 2016).

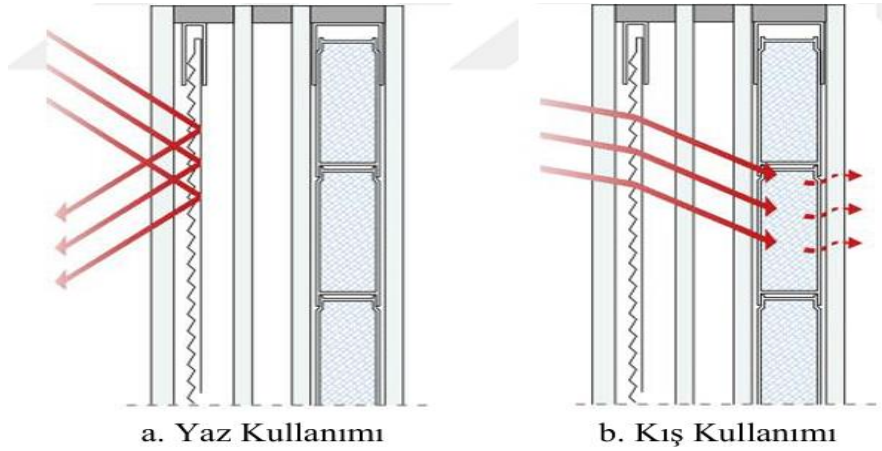
Şekil 11'de görüldüğü gibi 1,5 cm FDM'li alçı panel daha fazla kalınlığa sahip beton ve tuğla duvarla aynı termal özelliğe sahiptir. Bundan dolayı uygulanan duvarlara FDM ilave edilerek termal kapasitesi artırılabilir (Casini, 2016).



Şekil 11. Mikrokapsüllenmiş FDM'ye Sahip Alçı Panel ve Eşdeğer Termal Kapasiteye Sahip Duvar Örnekleri (Casini, 2016).

FDM'lerin başka bir kullanım şekli ise Şekil 12'de görülen duvar boşluğundaki cam sistemleridir. GlassX şirketi, güneş ışınımının yazın yansımalarını kışın ise depolanmasını

sağlayan yarı saydam bir cam sistemi geliştirmişlerdir. Tuz hidrat levhaların cam içine gömülmesiyle oluşturulan sistem yarı saydam bir duvar etkisi vermektedir (Casini, 2016).

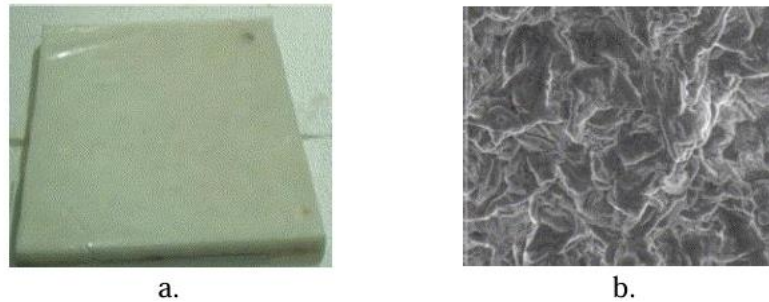


Şekil 12. Yaz ve kış mevsimlerinde glassX kristal FDM'li cam kullanımı (Casini, 2016).

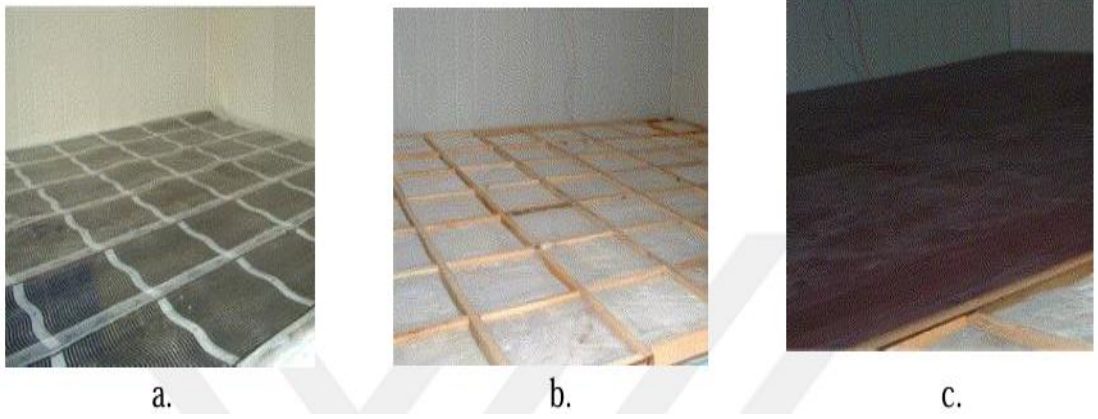
2.4.2. Bina Kabuğunun Döşemesindeki FDM Kullanım Uygulamaları

FDM ile entegre edilen yer karoları ve döşeme altı sistemleri pencereden giren güneş ışığından kolaylıkla yararlanabildiğinden gizli ısı depolama için sık kullanılan bir yöntemdir. Depolanan ısının yayılımına engel olmaması için zemin yüzeyinde halı gibi ek malzemelerin bulunmaması ve zemin malzemesinin seramik veya taş gibi iletken malzemelerden tercih edilmesi gerekmektedir (Casini, 2016).

Lin vd. (2005) Pekin'de yaptığı bir çalışmada şekil stabilize FDM'ler kullanılarak yeni bir tip yerden ısıtma sistemi geliştirmişlerdir. Buldukları yeni sistemle pik yapılan yüzey sıcaklığında gün boyunca FDM'nin erime sıcaklığı aralığında tutmuşlardır. Zeminin ısıtılması için gerekli olan gündüz elektriği kullanmak yerine gece dönem elektriği kullanılarak elektrik maliyetinin azaltılabileceği tespit etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada FDM plakaları ve zemine uygulanma aşamaları Şekil 13 ve Şekil 14'de gösterilmiştir.



Şekil 13. Stabilize FDM plakası (a) ve FDM'nin Elektron mikroskobu fotoğrafı (Lin vd., 2005).



Şekil 14. Elektrikli Isıtıcı (a) ve Şekil Stabilize FDM Plakaları (b) Yerleşimi ile Ahşap Zemin (c) Oluşumu (Lin vd., 2005).

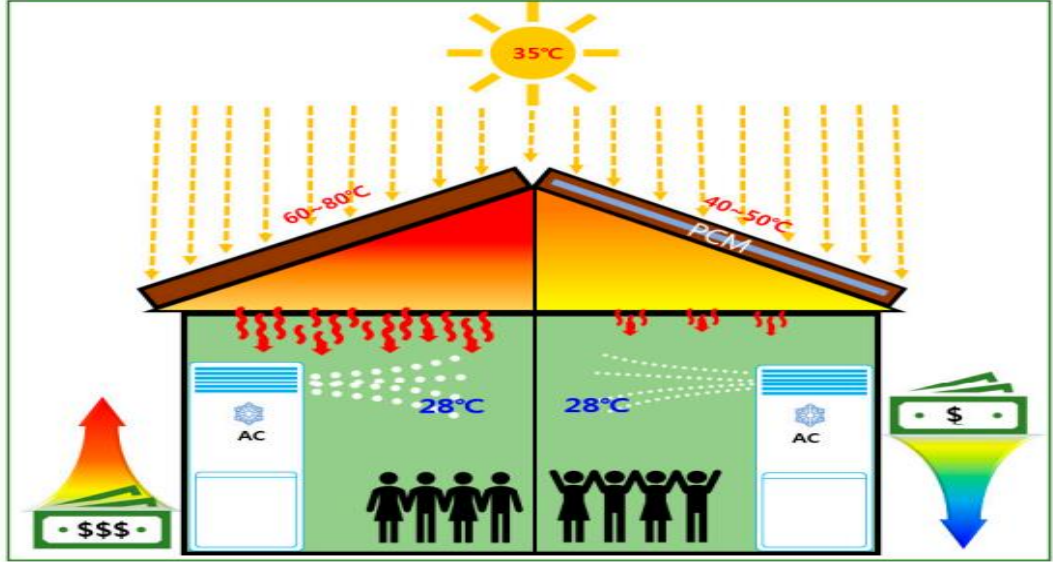
2.4.3. Bina Kabuğunun Çatısındaki FDM Kullanım Uygulamaları

Çatılar geniş yüzey alanına sahip olması, güneş açılarına direkt etki altında kalması ile birlikte değiştirebilmesi kolay olması sebebiyle FDM kullanımı için uygun yapı bileşenleridir. Çatılarda FDM kullanımının, iç hava sıcaklığını düşürme, maksimum zirve süresini geciktirme ve günlük konfor saatlerini artırma açısından bir çözüm olduğunu söylemek mümkündür (Godoy-Rangel vd., 2023).

FDM'nin çatıda kullanımı hava sıcaklığının yüksek olduğu yaz aylarında yapının ısı yükünü azaltabilir. Dış ortamdaki faz ısıyı bünyesinde depolayarak gün içerisinde yüksek ısının iç mekâna geçişini engeller ve geciktirir. Böylelikle iç mekandaki soğutma yüklerini azaltır. Şekil 15 ve Şekil 16'da görüldüğü gibi diğer bina bileşenlerine göre daha büyük alana sahip ve her yönde bulunduğu için güneş enerjisini depolama potansiyeli daha yüksektir (Anayurt, 2021).



Şekil 15. Ahşap çerçeveli çatıya monte edilen FDM (URL-1)



Şekil 16. Faz değişim malzemeleri kullanan serin çatı sisteminin enerji tüketiminde tasarruf üzerindeki etkisine ilişkin şematik gösterim (Kim vd., 2020).

2.5. FDM'nin Kullanıldığı Simülasyon Programları

Bina kabuğu bileşeninin termal, enerji analizleri, sarj deşarj süreleri, CO₂ salınımları için kullanılan, EnergyPlus, MATLAB, BLAST, TRNSYS, ESP-r, DOE-2, WUFI, RADCOOL, CLIM 2000, gibi farklı programlar mevcuttur. Kapsamlı olarak değerlendirildiğinde faz değişim süreçlerini ve tüm binayı simüle edebilme özelliğine birkaç program öne çıkmaktadır.

2.6. Faz Değiştiren Malzemelerin Isıl Performansları

Faz değiştiren malzemeler (FDM), belirli bir sıcaklık aralığında katı-sıvı faz geçişi sırasında yüksek miktarda gizli ısı depolayabilme yetenekleri sayesinde ısııl enerji depolama uygulamalarında yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Faz değişimi sırasında sıcaklığın yaklaşık olarak sabit kalması, FDM'leri iç ortam sıcaklık salınımlarının azaltılması ve bina ısııl performansının iyileştirilmesi açısından önemli bir mühendislik çözümü haline getirmiştir (Zalba vd., 2003).

FDM'lerin ısııl performans üzerindeki temel etkisi, ısııl depolama ve geri salım mekanizmasına dayanmaktadır. Gündüz saatlerinde çevresel sıcaklıkların artmasıyla birlikte FDM, çevreden aldığı ısıyı gizli ısı olarak depolamakta; gece saatlerinde sıcaklığın düşmesiyle birlikte bu enerjiyi kontrollü bir şekilde geri salmaktadır. Bu süreç, iç ortam sıcaklıklarının daha dengeli hale gelmesini sağlamak ve mekanik ısıtma-soğutma sistemlerine olan ihtiyacı azaltmaktadır (Khudhair ve Farid, 2004).

Bina uygulamalarında kullanılan FDM'lerin ısııl performansa katkısı, malzemenin faz değişim sıcaklığı, gizli ısı kapasitesi, ısııl iletkenliği ve kapsülleme yöntemi gibi

parametrelere bağılıdır. Özellikle bina konfor sıcaklık aralığına uygun faz değişim sıcaklığına sahip FDM'ler, iç ortam sıcaklık salınımlarını etkin bir şekilde bastırabilmektedir (Cabeza vd., 2011). Ancak düşük ısı iletkenliğe sahip FDM'lerde ısı transfer hızının sınırlı olması, sistem performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle kapsülleme ve kompozit yapıların kullanımı, ısı performansını artırılmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Makrokapsüllenmiş faz değiştiren malzemeler, FDM'nin boru, küre veya panel gibi kaplar içerisinde muhafaza edilmesiyle mekanik dayanım ve termal kararlılık sağlamaktadır. Bu yapı, özellikle bina çatı ve duvar sistemleri gibi dış çevre koşullarına maruz kalan uygulamalarda FDM kullanımını daha güvenli ve uzun ömürlü hale getirmektedir (Zhou vd., 2012). Literatürde yapılan nümerik ve deneysel çalışmalar, makrokapsüllenmiş FDM entegrasyonunun iç ortam sıcaklıklarını düşürdüğünü ve pik soğutma yüklerini önemli ölçüde azalttığını ortaya koymaktadır.

FDM'lerin bina ısı performansındaki etkileri yalnızca iç ortam konforu ile sınırlı kalmayıp, enerji tüketimi ve çevresel etkiler üzerinde de belirgin sonuçlar doğurmaktadır. Isıtma ve soğutma enerji ihtiyacındaki azalma, dolaylı olarak fosil yakıt tüketimini ve buna bağlı CO₂ emisyonlarını azaltmaktadır (Ascione vd., 2014). Bu yönüyle faz değiştiren malzemeler, sürdürülebilir bina tasarımı ve enerji verimliliği stratejileri içerisinde önemli bir yer tutmaktadır.

Faz değiştiren malzemelerin bina uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılabilmesi için kapsülleme teknikleri büyük önem taşımaktadır. Kapsülleme yöntemi, faz değiştiren malzemenin sızıntı riskini ortadan kaldırmakta, mekanik dayanımını artırmakta ve uzun süreli kullanımını mümkün kılmaktadır (Zalba vd., 2003). Makrokapsüllenmiş faz değiştiren malzemeler, FDM'nin boru, panel veya küresel kaplar içerisinde muhafaza edilmesiyle hem yapısal bütünlüğün korunmasını hem de ısı performansını kararlı bir şekilde sürdürülebilmesini sağlamaktadır. Bu yöntem, özellikle çatı sistemleri gibi dış çevre koşullarına doğrudan maruz kalan yapı elemanlarında FDM kullanımını daha güvenli ve uygulanabilir hale getirmektedir (Zhou vd., 2012).

Bina çatısına entegre edilen makrokapsüllenmiş FDM sistemleri, gündüz saatlerinde güneşten kaynaklanan ısı kazançlarını depolayarak iç ortama iletilen ısı miktarını sınırlamakta, gece saatlerinde ise depolanan ısıyı kontrollü bir şekilde geri salınmasını sağlamaktadır. Bu mekanizma sayesinde iç ortam sıcaklıkları daha kararlı hale gelmekte ve sıcaklık salınımları önemli ölçüde azalmaktadır (Khudhair ve Farid, 2004). Literatürde yapılan çalışmalar, bu tür sistemlerin özellikle yaz koşullarında

mekanik soğutma ihtiyacını azalttığını ve pik soğutma yüklerini düşürdüğünü göstermektedir (Cabeza vd., 2011).

Makrokapsüllenmiş faz değiştiren malzemelerin çatı sistemlerinde kullanılmasıyla elde edilen enerji tasarrufu, bina toplam enerji tüketiminin azalmasına ve buna bağlı olarak fosil yakıt kullanımının sınırlandırılmasına katkı sağlamaktadır. Enerji tüketimindeki bu azalma, dolaylı olarak CO₂ emisyonlarının düşürülmesini mümkün kılmakta ve bina sektörünün çevresel etkilerinin azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır (Ascione vd., 2014).

Bu tez çalışmasında, bina çatısına entegre edilen makrokapsüllenmiş faz değiştiren malzemelerin bina ısı performans ve CO₂ emisyonları üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında, DesignBuilder arayüzü ve EnergyPlus enerji simülasyon yazılımı kullanılarak Türkiye'nin farklı iklim bölgelerini temsil eden tipik bir konut binası modellenmiştir. FDM içeren ve içermeyen çatı sistemleri karşılaştırılarak iç ortam sıcaklıkları, yıllık ısıtma ve soğutma enerji tüketimleri ile buna bağlı CO₂ emisyonları değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçların, bina enerji verimliliği alanında yapılacak akademik çalışmalara katkı sağlaması ve makrokapsüllenmiş faz değiştiren malzemelerin çatı sistemlerinde kullanımına yönelik mühendislik uygulamalarına yol gösterici olması hedeflenmektedir.

3. LİTERATÜR ÖZETİ

Yapılan bir çalışmada İran'ın Yazd kentinin sıcak-kurak iklim koşullarında, faz değişim malzemesi (FDM) entegreli tavan sistemlerinin soğutma performansını düz (flat) ve kubbeli (domed) çatı olmak üzere iki farklı çatı konfigürasyonu altında deneysel olarak değerlendirmiştir. 1/4 ölçekli bir bina modeli kullanılmış ve üç farklı sistem konfigürasyonu incelemiştir. Temel FDM tavan sistemi, fan destekli FDM tavan sistemi (FDM-F) ve mini soğutucu destekli FDM tavan sistemi (FDM-C) olmak üzere her bir konfigürasyon hem düz hem de kubbeli çatı düzenlerinde test etmiştir. Yaptıkları çalışmaların sonucunda FDM entegrasyonu, düz çatılı sistemlerde ortalama iç ortam hava sıcaklığını 4 °C'ye kadar, kubbeli çatılı sistemlerde ise 5 °C'ye kadar düşürmüştür. FDM-C konfigürasyonu, özellikle hava sirkülasyonunun iyileşmesi sayesinde, kubbeli çatı ile birlikte kullanıldığında en etkili soğutma performansını ve en yüksek termal konforu sağladığını tespit etmiştir. Ayrıca Çevresel etki analizi sonuçları, FDM tabanlı sistemlerin CO₂ emisyonlarını % 53'e kadar düşürdüklerini kubbeli çatının ise düz çatıya göre biraz daha iyi performans sergilediklerini bulmuşlardır. Elde ettikleri bulgular, özellikle yardımcı soğutma sistemleriyle birlikte kullanılan FDM entegreli kubbeli tavan sistemlerinin, sıcak-kurak iklimlerde pasif soğutma ve enerji tasarrufu açısından umut verici bir strateji sunduğunu ortaya koymuşlardır (Rabani vd., 2025).

Yapılan bir çalışmada, parafin bazlı faz değiştirici malzeme (FDM) yardımıyla metal çatılı tek katlı endüstriyel bir binanın iç mekan sıcaklığını düşürmek için deneysel bir araştırma yapılmıştır. Yapılan çalışmayla geleneksel güç ihtiyacını önemli ölçüde azaltabilecek binanın toplam soğutma yükünü azaltmaya çalışılmıştır. Önerilen binanın ölçekli bir modeli üretilmiş ve analiz için test edilmiştir. Deneyler, çatıda FDM bulunmayan ilk durum (Düz Çatı) ve çatının içine FDM olarak parafin yerleştirilmiş ikinci durum (FDM Çatı) olmak üzere iki çalışma gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları, tek katlı binanın metal çatısının içine PCM (Faz Değişim Malzemesi) yerleştirilmesinin, dış çatı, iç çatı ve dolayısıyla bina iç mekânının sıcaklığını büyük ölçüde düşürdüğünü göstermiştir. Niceliksel olarak, FDM yardımıyla günlük ortalama iç mekan sıcaklığı 5°C, en yüksek iç mekan sıcaklığı ise 9,5°C düşürülmüştür (Boobalakrishnan vd., 2021).

Yapılan çalışmada kuzey Fas'ın yaz iklim koşullarında FDM entegre edilmiş bir dış duvar ve çatının termal performansını araştırmayı amaçlamıştır. Bunun için, direnç-kapasitans (RC) yaklaşımına dayalı tek boyutlu bir sayısal model geliştirilmiş ve duvar/çatı yapısı boyunca ısı transfer sürecini simüle etmek için çözmüştür. Model, yeni

bir küçük ölçekli deneysel cihaz aracılığıyla doğrulamıştır. FDM katmanının duvar/çatı yapısı içindeki yerleşimi, iki olası konfigürasyon dikkate alınarak değerlendirmiştir. Elde edilen sonuçlar, uygun FDM kalitesinin kullanımıyla farklı duvar cephelerinin ve çatıların termal performansında önemli bir iyileşme olduğunu göstermiştir (Kharbouch vd., 2018).

Çeşitli konfigürasyonlara sahip FDM entegre çatıların termal performansına, FDM'lerin etkisini değerlendirmek için sayısal bir simülasyon yapmıştır. FDM OM30, Hindistan'ın Surat şehrinin iklim koşullarında FDM entegre çatılarında tavan sıcaklığı dalgalanmalarını azaltmada önemli bir potansiyel göstermiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda tuğla-beton bir çatıya 1.5 cm'lik bir OM30 tabakası eklenmesinin maksimum tavan sıcaklığını 3.55°C azaltabileceğini göstermiştir. Beton çatılarda sıcaklık düşüşü yaklaşık 8°C'ye ulaşabilirken, metal çatılarda bu düşüş 13.8°C'ye kadar çıkabileceğini tespit etmiştir (Prajaapati vd., 2025).

Yapılan bir çalışma da hafif yapılardaki yaz termal konforunu iyileştirmek için faz değişim malzemelerinin (FDM) etkinliğini değerlendirmiştir. DuPont Energain duvar panelleri şeklinde FDM'nin çatı ile kombinasyonu kullanarak deneyler yapmıştır. FDM'nin etkinliğini etkileyen iki faktör (FDM katmanının kalınlığı ve konumu) araştırmıştır. Kazablanka hava koşullarına maruz bırakılan iki özdeş test boşluğu kullanılarak deneysel bir çalışma yapmıştır. Çatı yüzey sıcaklıkları ve zarf boyunca ısı akısı yoğunlukları gibi termal veriler incelemiştir. Çalışmaların sonucunda referans odaya (FDM'siz) kıyasla, termal depolamanın güneş radyasyonunun depolanmasına ve güneş ışınlamından 6-7 saat sonrasında kadar salınmasına olanak sağladığını göstermiştir; bu durum hem günlük sıcaklık değişimlerinin (2 °C'ye kadar) hem de ısı akısının (%88'den fazla) azaltılmasında etkili olduğu ayrıca çatının dış yüzeyinde 10,52 mm kalınlığında FDM'nin iyi bir ısı yalıtım etkisi ve enerji verimliliği potansiyeline sahip olduğu kanıtlamıştır (Mourid vd., 2017).

Yapılan bir çalışmada üç farklı FDM (FS29 (şekil kararlı karışım), HS29 (hidratlı tuz) ve OM29 (organik karışım)) ile altı farklı FDM-betonarme (RCC) çatı dış cephesi durumu (dış tarafta FDM katmanı bulunan RCC çatı, merkezde (ortada) FDM katmanı bulunan RCC çatı, iç tarafta FDM katmanı bulunan RCC çatı, dış ve merkezde FDM katmanları bulunan RCC çatı, merkez ve iç tarafta FDM katmanları bulunan RCC çatı ve dış ve iç tarafta FDM katmanları bulunan RCC çatı) kullanılarak gerçekleştirmiştir. FDM'nin termofiziksel özelliklerini deneysel olarak bakmıştır. Sıcak-kurak ve ılıman bölgelerde, HS29 ile birlikte RCC'nin dışına monte edilen FDM katmanı, sırasıyla 6.29 ve 6.61 \$/m² ile klima giderlerinde en büyük tasarrufu sağladığını tespit etmiştir. Ayrıca,

daha hızlı geri ödeme süreleriyle birlikte en büyük karbon azaltışımı (300.55 kg CO₂/yıl ve 281.58 kg CO₂/yıl) bildirmiştir (Cuce vd., 2024).

İç ve dış sıcaklıklar arasındaki farkı, enerji tüketimini ve CO₂ emisyonunu değerlendirmek için DesignBuilder'da küçük bir stüdyo odası modellemiştir. Erime sıcaklığı 23°C olan FDM kompoziti, bina modelinin çatısına ve duvarına yerleştirmiştir. Sonuçlar, FDM kompozitinin kullanımının, kontrol odası modeline kıyasla yaz ve kış aylarında iç sıcaklığı 2-3 °C düşürdüğünü tespit etmiştir. Dış ve iç sıcaklık arasındaki fark ne kadar büyüksün, iç sıcaklık dalgalanmaları o kadar azalır ve dolayısıyla enerji tüketimi de o kadar düşeceğini bildirmiştir. Ayrıca simülasyon, FDM'nin binaya entegre edilmesinin ekonomik ve çevresel faydalarını vurgulamıştır. Enerji tüketimi yaz aylarında %33.4 oranında azalırken, kış aylarında %7.0'e kadar azaldığını tespit etmiştir (Yousefi vd., 2023).

Bu araştırma, FDM'nin kuzey, güney, batı ve doğu duvarlarına, tek tek veya tüm duvarlara aynı anda ya da düz bir çatıya entegre edilmesiyle elde edilen gizli ısı aktivasyonunun enerji tasarrufu potansiyelini değerlendirmeye odaklanmıştır. Yapılan çalışma Köppen-Geiger sınıflandırma sistemine göre Csa iklim bölgesinde bulunan Akdeniz tipi tek katlı bir eve ait olduğu her senaryoya göre, FDM erime sıcaklığı ve katman kalınlığı kombinasyonları için yıllık olarak incelemiş ve toplamda 300 senaryo oluşturmuştur. Bunlar, en az miktarda FDM kullanılarak en yüksek enerji tasarrufunu sağlayan çözümleri belirlemek için analiz etmiş ve karşılaştırmıştır. Tek duvar entegrasyonu için, güney duvar yönlendirmesi, 20 mm FDM kalınlığı ve 25 °C erime sıcaklığı durumunda 77 kWh'lik en yüksek tasarruf elde etmiştir. Gizli ısı aktivasyonu, toplam enerji tasarrufunun %87.8'ini temsil ettiğini bildirmiştir. Tüm duvarlara eş zamanlı entegrasyon, %91.2'si gizli ısıdan kaynaklanan 397.8 kWh'lik bir enerji tasarrufu sağlarken, düz çatı entegrasyonu %96.5'i gizli ısıdan kaynaklanan 432.5 kWh'lik bir tasarruf sağlamıştır. Düz çatı, FDM entegrasyonu için en etkili seçenek olarak ortaya çıktığını ve FDM'nin kilogramı başına 0.433 kWh ile 0.140 kWh arasında tasarruf sağladığını bulmuştur. Tek duvar entegrasyonu ise yalnızca 0.259 kWh kg⁻¹ ile 0.119 kWh kg⁻¹ arasında tasarruf sağlayarak, karşılaştırılabilir °C'de düşük bir enerji tasarrufu performansı göstermiştir. Ayrıca, FDM katman kalınlığına ve cephe seçimine bağlı olarak 189.9 kg'a kadar CO₂ azaltımı elde ettiklerini bulmuştur (Tunçbilek vd., 2025).

Yapılan bir çalışma da bir test odasının çatı döşemesine entegre edilmiş inorganik ötektik bir FDM'nin termal performansını incelemeyi ve bina termal yönetimi için potansiyelini analiz etmeyi amaçlamıştır. Yapılan deney de yaz, sonbahar ve kış aylarında Antofagasta'da (Şili) iki test odasında gerçekleştirmiştir. FDM, birinci test odasının

çatısına entegre edilirken, ikinci odanın çatı paneli kapalı bir hava boşluğu olmuştur. Yapılan çalışma sonlu fark yöntemi kullanılarak oluşturulan ve odaların termal davranışını simüle etmek için kullanılan sayısal bir model sunmuştur. FDM odasının termal simülasyonları, FDM panelinin farklı iklimlerde gizli ısı termal enerjisini depolama yeteneğini değerlendirmek ve karşılaştırmak için Şili'nin diğer bölgelerinde de gerçekleştirmiştir. Sonuçlara göre Antofagasta'daki FDM odasının iç sıcaklığının yalnızca $21.1^{\circ}\text{C} \pm 10.6^{\circ}\text{C}$ değiştiğini, hava panelli odanın ise $28.3^{\circ}\text{C} \pm 18.5^{\circ}\text{C}$ değiştiğini gösterdiğini bildirmiştir. Diğer şehirlerde yapılan termal simülasyonlar, FDM panelinin kış aylarında daha iyi termal performans gösterdiğini, oda sıcaklığını konforlu sıcaklıklara ulaşmak için birkaç $^{\circ}\text{C}$ artırmaya veya korumaya yardımcı olduğunu göstermiştir (Simon vd., 2023).

Shi vd. (2024) yaptığı çalışmada, geliştirilen FDM modülünü entegre eden pasif sıcaklık kontrollü bir binanın sayısal modeli ANSYS yardımıyla oluşturmuştur. Oluşturulan modelde, Pekin şehrinin gerçek hava koşulları sınır koşulları olarak belirlenmiş ve radyasyon modeli dikkate alınarak iç mekan doğal konveksiyonu simüle etmiştir. FDM'nin kalınlığının ve konumunun iç sıcaklık alanı üzerindeki etkileri analiz etmiş ve tartışmıştır. FDM miktarı yeterli olduğunda, FDM miktarının daha da artırılması sıcaklık dalgalanmasında $0,1^{\circ}\text{C}$ 'den daha az bir azalmaya neden olacağını ve konfor süresini artırmayacağını bildirmiştir. FDM'nin duvara yerleştirilmesi, iç mekân sıcaklığında dikey yönde belirgin bir değişime neden olacağını tersine koyulduğunda FDM'nin çatıya yerleştirilmesi, ısı transfer hızında yedi kata kadar bir farka yol açabileceğini göstermiştir. FDM'nin optimum yerleşimi, ortam ve faz değişim sıcaklıkları arasındaki farka bağlıdır. Tüm bu sonuçlara göre, FDM'nin dikey duvarlara uygulanması daha iyi performans sağlanacağını aynı kalınlıktaki FDM'nin farklı uygulama pozisyonlarından kaynaklanan doğal konveksiyondaki önemli fark, hava hareketinin FDM'nin erimesi ve katılaşması üzerindeki etkisiyle birleştiğinde, iç mekan sıcaklık dalgalanmalarını ve konforu daha da etkileyeceğini bulmuştur (Shi vd., 2024).

Yapılan başka bir çalışmada, FDM entegre edilmiş içi boş beton bloklar ve içi boş çatılarla tasarlanmış binaların termoekonomik performansını araştırmıştır. HS24 (Hidratlı tuz), OM21 (organik karışımlar), OM30, OM35 ve OM46 olmak üzere beş farklı FDM ele alınmıştır. Üç farklı FDM entegre beton blok konfigürasyonu (İç taraf FDM katmanı (W-1), Orta FDM katmanı (W-2) ve Dış taraf FDM katmanı (W-3)) ve iki farklı FDM entegre çatı kiremit konfigürasyonu (İç taraf FDM katmanı (R-1) ve Dış taraf FDM katmanı (R-2)) ile otuz farklı bina modeli incelemiştir. OM30 FDM entegre kompozit duvar ve çatı kiremit, incelenen diğer FDM'lere göre daha iyi termoekonomik performans

gösterdiğini tespit etmiştir. FDM kompozit duvar (W-3) ve FDM çatı kiremitinin (R-2) birleşiminden oluşan bina modeli konfigürasyonu (BC-F), hem sıcak ve kuru (Jodhpur) hem de karma (Yeni Delhi) iklimlerde en yüksek yıllık klima maliyeti tasarrufunu ve en yüksek yıllık karbon emisyonu azalmasını gösterdiğini bildirmiştir (Arumugam vd., 2021).

Yu vd. (2020) yaptığı bir çalışmada şekil-kararlı FDM'li (VRFP) yeni bir havalandırmalı çatı önermiştir. FDM üst katmana, havalandırma kanalı ise orta katmana yerleştirmiştir. Bu çatının iç yüzey sıcaklığı, geleneksel FDM çatısına kıyasla önemli ölçüde azaldığını tespit etmiştir. Güney Çin'deki Wuhan şehrinde gece havalandırmalı bu FDM çatısının termal performansı, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) simülasyonu yoluyla incelemiştir. Erime sıcaklığı aralığı, şekil-kararlı FDM katmanının kalınlığı ve havalandırma stratejisinin termal performans üzerindeki etkileri analiz etmiştir. Yaptıkları çalışmanın sonucuna göre Wuhan şehrinde optimum erime sıcaklığı aralığının 35~38 °C, uygun FDM katman kalınlığının 30~40 mm ve optimum havalandırma hızının 2.4~2.5 m/s olduğunu tespit etmiştir (Yu vd., 2020).

Yang vd. (2019) yaptığı bir çalışmada “FDM serin çatı sistemi” geliştirmek ve FDM serin çatı sistemini çatı yüzeyine uygulayarak performansını değerlendirmek istemiştir. İlk olarak, iç mekan yapay iklim odası kullanılarak optimum FDM ve kaplama malzemeleri seçilmiştir. İkinci olarak, FDM serin çatı sistemi test düzeneğine uygulanmış ve yüzey sıcaklıklarındaki değişimler ölçülerek ısı adası üzerindeki azalımı etkisi belirlenmiştir. Üçüncü olarak, test düzeneğinden elde edilen verilere dayanarak sayısal analiz yoluyla Seul, Gangdong-gu'daki hava akımları analiz edilerek kentsel ısı adası etkisinin azaltılması doğrulamasını yapmıştır. Deney düzeneği kurulmuştur. Yaptıkları çalışma sonuçlarına göre FDM serin çatı sistemi kullanıldığında tüm mevsimlerde çatı yüzey sıcaklıklarında azalma etkisi görüldüğünü bildirmiştir. Her mevsim için maksimum sıcaklık farkı kışın 2.5°C, ara mevsimde 4.7°C ve yazın 5.7°C olarak tespit etmiştir (Yang vd., 2019).

Terhan ve Ilgar (2023) yaptığı bir çalışmada farklı kalınlıklarda ve erime sıcaklıklarında dış duvarlara entegre edilmiş iki farklı faz değişim malzemesinin (FDM) binanın termal enerji performansı üzerindeki etkileri araştırmıştır. Dış duvara entegre edilen FDM'nin konumunu değiştirerek dört farklı dış duvar tipi tasarlamıştır. Her duvar tipi için üç farklı kalınlık (katman) incelenmiş ve FDM'nin ısıtma ve soğutma enerji taleplerini azaltarak sağladığı enerji tasarrufu aylık ve yıllık bazda hesaplamıştır. Enerji simülasyon analizlerine göre, yıllık bazda en yüksek ısıtma enerjisi tasarrufunu (% 21.32) sağlayan konfigürasyon, erime sıcaklığı 21 °C olan üç katmanlı BioPCM27 entegre dış duvar olduğunu tespit etmiştir. FDM'lerin aylık optimum erime sıcaklıkları, saatlik enerji

simülasyon analizi sonuçları değerlendirilerek, dış duvarlara entegre edilen FDM'nin şarj ve deşarj süreçlerine göre belirlemiştir. Yıllık ortalama optimum erime sıcaklığı, dış duvar ve malzeme türlerine bağlı olarak 18 ile 19 °C arasında değiştiğini bildirmiştir. Üç katmanlı (3L) InfiniteRPCM21C konfigürasyonu (Tip 3), soğutma sezonunda %24.45 ve ısıtma sezonunda %14.76 toplam enerji tasarrufu ile tüm dış duvar tipleri arasında en iyi termal enerji performansına sahip olduğunu bulmuştur (Terhan ve Ilgar, 2023).

4. METARYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında Csa iklim sınıfında yer alan İstanbul ilinde uluslararası standartlar gözetilerek oluşturulan çok katlı bir bina modeli DesignBuilder yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Oluşturulan bina dış yüzeye bakan duvarlar, pencereler, kapılar yapı bileşenleri sabit kalmak suretiyle 3 farklı kullanım çatı modeli olarak tasarlanmıştır. Oluşturulan çatı modelleri teras çatılı, kullanılmayan çatı aralı ve kullanılan çatı aralı olarak belirlenmiştir. Çatı modellerde kendi içlerinde farklı senaryolar için çatı katmanındaki yapı bileşenlerine göre farklı senaryolar oluşturulmuştur. Senaryolara göre yapı bileşen katmanlarına arasına makrokapsüllenmiş organik ve inorganik faz değiştiren malzemeler yerleştirilmiştir. Kullanılan FDM'in termofiziksel özelliklerine farklı kaynaklardan taranan literatürler ve çeşitli üretici firmalardan elde edilen ürün belgeleri aracılığı ile ulaşılmıştır. Tez çalışmasında modellenen binanın kullanım çatı modeline göre öncelikle FDM'in yapı bileşenlerindeki yerleri, çeşitleri ve kalınlıkları değiştirilerek farklı çatı konfigürasyonları oluşturulmuştur. Modellenen binanın DesignBuilder modelleme programı algoritmaları kullanılarak çatı bina kabuğunun HVAC (Heating, Ventilation, Air Conditioning) Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme koşullarının yıllık, aylık ve saatlik sıcaklık verileri analiz edilmiştir. Bina dış kabuğunda kullanılan çeşitli faz değiştiren malzemelerin ısıtma ve soğutma sistemine etkileri araştırılmıştır. Daha sonra da oluşturulan senaryolarda kullanılan FDM'lerin farklı erime sıcaklıklarının (18°C, 21°C, 23°C, 24 °C, 25 °C, 28 °C ve 29°C) enerji modellemesine etkileri üzerine karşılaştırmalar yapılmıştır.

4.1. Simülasyonu Yapılan Bina Modeli İçin Bilgiler

4.1.1. Lokasyon ve İklimsel Veriler

Tasarlanan bina modelleri için 2024 yılındaki İstanbul İlinin meteorolojik verileri seçilmiştir. Modelleme yapılacak bina için tek lokasyon olarak Csa iklim tipi seçilmiştir. Csa iklim tipi, ılıman bir iklime sahiptir. Simülasyonu oluşturulacak binanın ısıtma-soğutma sistemlerinin enerji modellemesi için programdan çekilen İstanbul iline ait 2024 yılı saatlik sıcaklık verileri EnergyPlus simulasyon programından çekilmiştir. Simülasyonu yapılacak olan binaya ait lokasyon bilgileri Tablo 1'de oluşturulmuştur.

Tablo 1. Simülasyon yapılan binanın lokasyon verileri

İSTANBUL	
Ülke	Türkiye
Bölge	Marmara Bölgesi
İklim	Csa İklim Sınıfı
Rakım(m)	37.0 m
Enlem(deg)	40.97°
Boylam(deg)	28.32°
Simüle Edilen Saat	8760 saat

4.1.2. Simülasyonu Yapılan Binanın Program Bilgileri

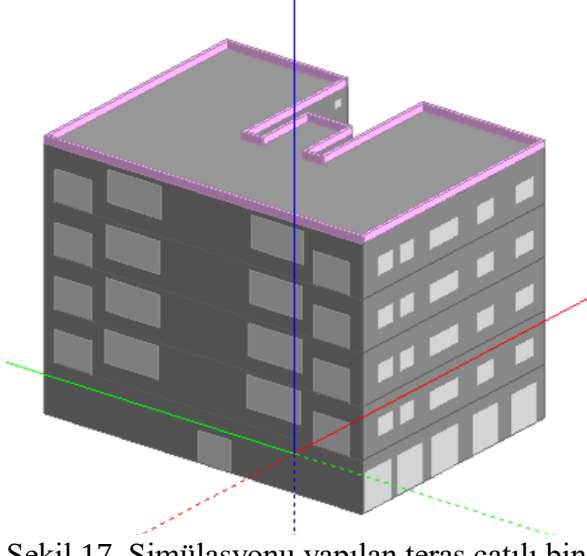
Simülasyonu yapılan bina modelleri Amerikan Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Birliği (ASHRAE-55 2004- American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers) standartlarına uymak şartıyla modellenmiştir. Proje çizimleri, bina enerji performansı, termal konfor, güneş ışığı, HVAC sistemleri ve karbon emisyonlarını değerlendirmek için kullanılan dinamik bina simülasyon yazılımı kullanılmıştır. (DesignBuilder Software Ltd., 2023). Hesaplamaları bina enerji modelleme programlarından yüksek hesaplama performansına sahip, EnergyPlus, ısı transferi, hava akışı, nem taşınımı, güneş kazançları ve mekanik sistemleri aynı anda çözen fizik tabanlı bir hesaplama altyapısına sahip olan ara yüz kullanılmıştır (Crawley vd., 2001).

DesignBuilder modelleme programının hızlı modelleme teknikleri, tasarım detaylarındaki geniş çalışma yelpaze arağında etkin modülleri yardımıyla kolay ve ekonomik olarak analizler yapılabilmektedir. DesignBuilder programı kullanarak modellenen binaların ısıtma, soğutma, enerji hesaplamaları, konfor ve aydınlatma hesaplamaları, karbon salınımı, nem ve sıcaklık verileri, iklim verilerine kolaylıkla ulaşılabilir. DesignBuilder yazılımı, EnergyPlus hesap motorunu kullanarak, bina enerji performansını zamana bağlı sayısal yöntemlerle çözer. Isı iletimi, klasik yapı elemanları için iletim transfer fonksiyonlarıyla; faz değiştiren malzemeler için ise entalpi tabanlı sonlu farklar yöntemiyle modellenir. Her termal zon için enerji dengesi denklemleri implicit şemalarla çözülür ve HVAC sistemleri kontrol algoritmalarıyla entegre şekilde hesaplanır (U.S. Department of Energy, 2021).

4.1.3. Teras Çatılı Binanın Mimari Bilgileri

Teras çatılı bina modelin mimari projesi zemin kat ve 4 normal kattan oluşmaktadır. DesignBuilder modelleme programında üç boyutlu (3D) olarak gerçek ölçüleri dikkate alınarak modellenmiştir. Enerji hesaplarında tüm sistemlerin girdi verileri dikkate alınarak tek tek modellenmiştir.

Binanın DesignBuilder programında modellenmesine ait görsel Şekil 17’de verilmiştir. Model toplamda 5 blok, 15 zondan oluşmaktadır. Bina yaklaşık 315 m² oturum alanına ve 17,5 m bina yüksekliğine sahiptir. Simülasyonu yapılacak olan binanın mimari bilgileri Tablo 2’de verilmiştir.

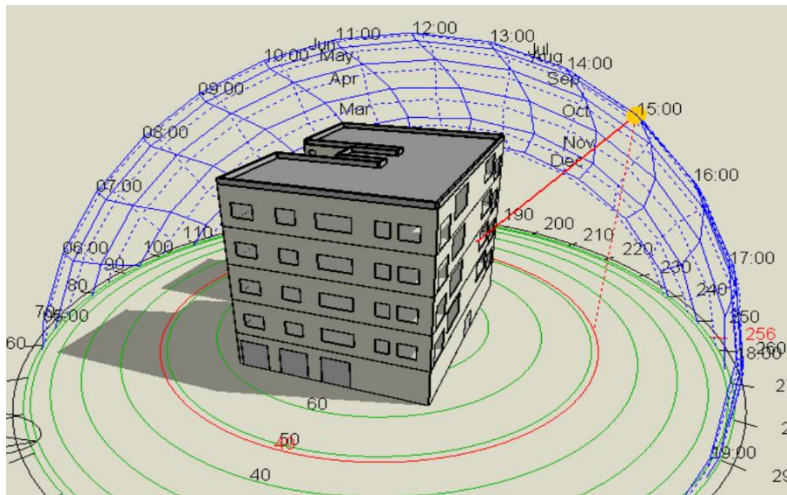
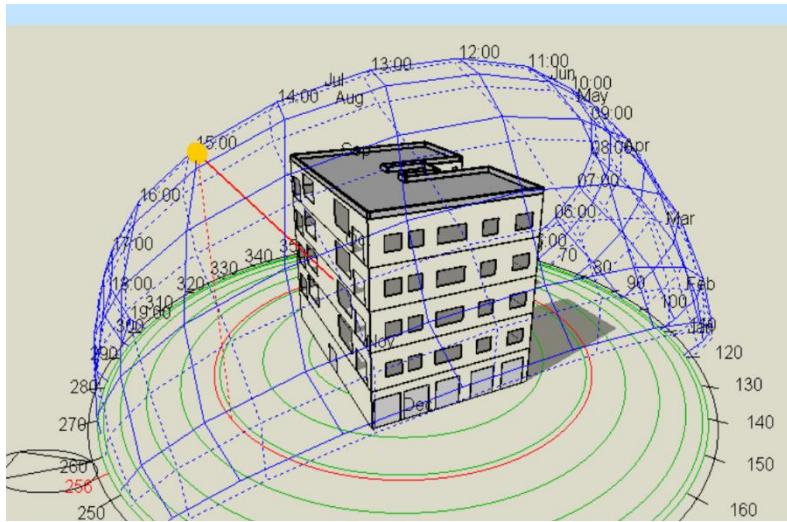


Şekil 17. Simülasyonu yapılan teras çatılı bina

Tablo 2. Simülasyonu yapılan teras çatılı binanın mimari bilgileri

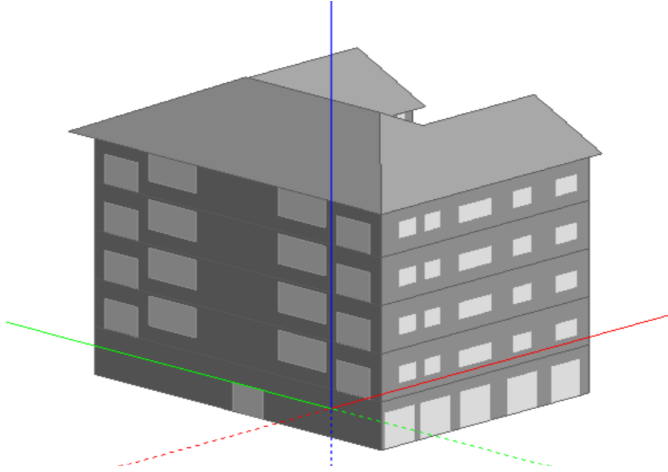
	Toplam İnşaat Alan(m ²)	Dış Duvar Alanı	Dış Pencere Alanı	Dış Kapı Alanı	Zemin Alan	Çatı Alanı
Toplam	1575	1791.66	225.02	56.55	315	315
Kuzey	-	512.89	49.93	19.51	-	-
Doğu	-	382.92	18.37	-	-	-
Güney	-	512.89	51.00	32.41	-	-
Batı	-	382.97	105.73	4,63	-	-

Hesaplamalarda güneş gelme açısının en yüksek olduğu durum gözetilmiştir. Azimut açısı değerinin 0 olduğu güneye bakan dış çatının kısmı olan Blok5-Zone15 alınmıştır. Blok5-Zone15 çatıya bakan güneşin geliş açısına ait görseller Şekil 18 ve Şekil 19’da verilmiştir.



4.1.4. Kullanılmayan Çatı Aralı Binanın Mimari Bilgileri

Kullanılmayan çatı aralı bina modelin mimari projesi zemin kat, 4 normal kat ve kullanılmayan çatı arasından oluşmaktadır. DesignBuilder modelleme programında üç boyutlu (3D) olarak gerçek ölçüleri dikkate alınarak modellenmiştir. Enerji hesaplarında tüm sistemlerin girdi verileri dikkate alınarak tek tek modellenmiştir. Binanın DesignBuilder programında modellenmesine ait görsel Şekil 20’de verilmiştir. Model toplamda 5 blok, 1 çatı aralı kullanılmayan boşluk, 16 zondan oluşmaktadır. Bina yaklaşık 315 m² oturum alanına ve çatı mahyası ile birlikte 20.5 m yüksekliğine sahiptir. Simülasyonu yapılacak olan binanın mimari bilgileri Tablo 3’de verilmiştir.

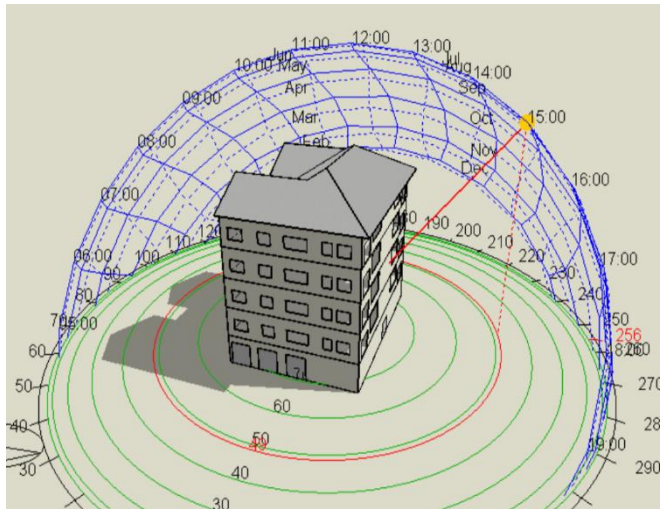


Şekil 20. Simülasyonu yapılan kullanılmayan çatı aralı bina

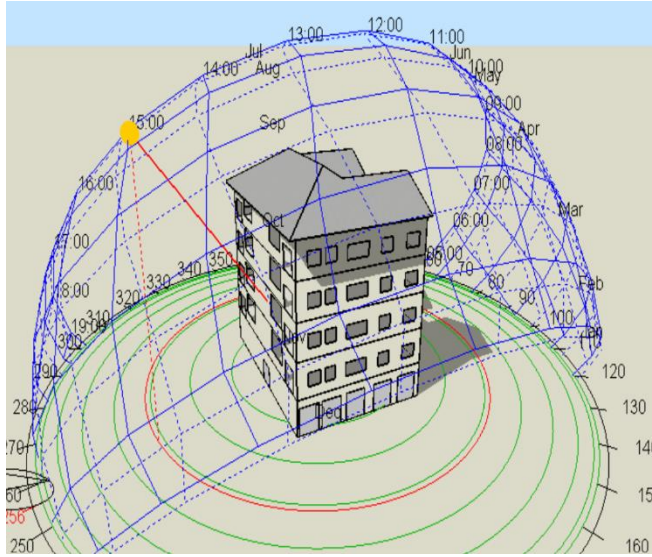
Tablo 3. Simülasyonu yapılan kullanılmayan çatı aralı binanın mimari bilgileri

	Toplam İnşaat Alan(m ²)	Dış Duvar Alanı	Dış Pencere Alanı	Dış Kapı Alanı	Zemin Alan	Çatı Alanı
Toplam	1890	1822.29	223.49	56,55	315	454.33
Kuzey	-	512.89	49.93	19,51	-	-
Doğu	-	413.55	18.37	-	-	-
Güney	-	512.89	51.00	32,41	-	-
Batı	-	382.97	104.20	4,63	-	-

Hesaplamalarda güneş gelme açısının en yüksek olduğu durum gözetilmiştir. Azimut açı değerinin 0 olduğu güneye bakan dış çatının kısmı olan Roof1-Zone1 alınmıştır. Roof1-Zone1 bakan çatının güneşe geliş açısına ait görseller Şekil 21 ve Şekil 22’de verilmiştir.



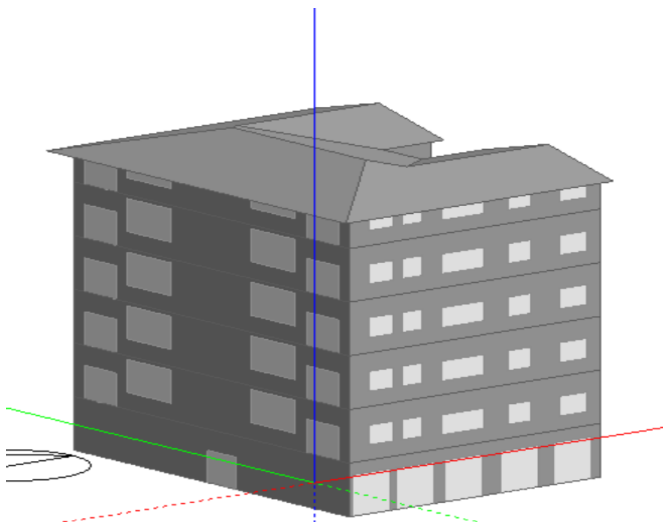
Şekil 21. Kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki Roof1-Zone1 çatısına düşen güneş açısı-1



Şekil 22. Kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki Roof1-Zone1 çatısına düşen güneş açısı-2

4.1.5. Kullanılan Çatı Aralı Binanın Mimari Bilgileri

Kullanılan çatı aralı bina modelin mimari projesi zemin kat, 4 normal kat ve kullanılan çatı arasından oluşmaktadır. DesignBuilder modelleme programında üç boyutlu (3D) olarak gerçek ölçüleri dikkate alınarak modellenmiştir. Enerji hesaplarında tüm sistemlerin girdi verileri dikkate alınarak tek tek modellenmiştir. Binanın DesignBuilder programında modellenmesine ait görsel Şekil 23’de verilmiştir. Model toplamda 5 blok, 1 kullanılan çatı arası katı olmak üzere 18 zondan oluşmaktadır. Bina yaklaşık 315 m² oturum alanına ve çatı mahyası ile birlikte 21.5 m bina yüksekliğine sahiptir. Simülasyonu yapılacak olan binanın mimari bilgileri Tablo 4’de verilmiştir.

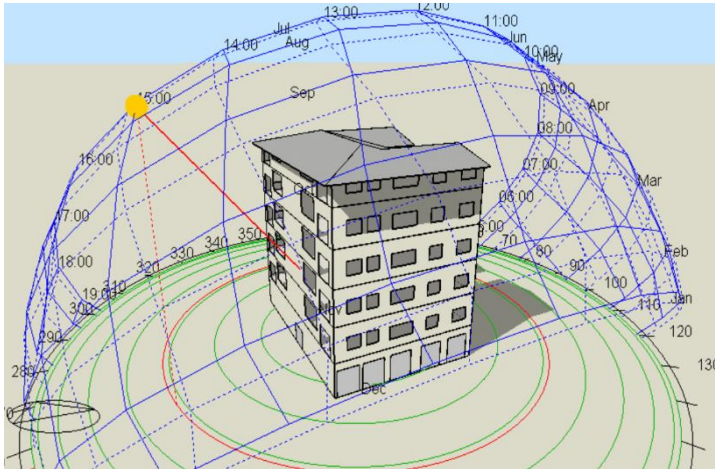


Şekil 23. Simülasyonu yapılan kullanılan çatı aralı bina

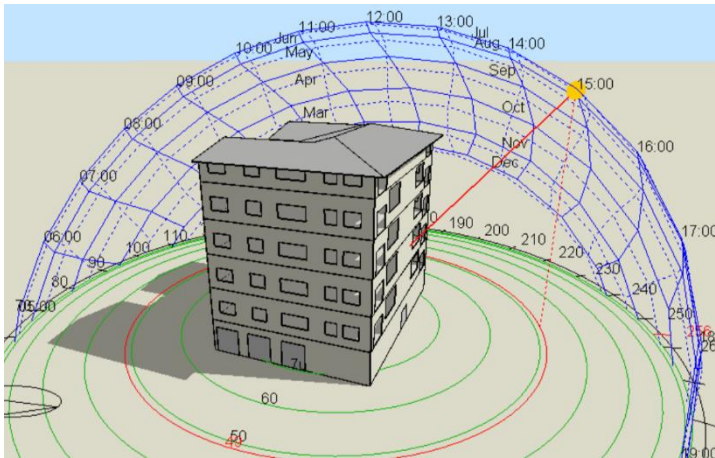
Tablo 4. Simülasyonu yapılan kullanılan çatı aralı binanın mimari bilgileri

	Toplam İnşaat Alan(m ²)	Dış Duvar Alanı	Dış Pencere Alanı	Dış Kapı Alanı	Zemin Alanı	Çatı Alanı
Toplam	1890	1933.66	263.51	56.55	315	405.99
Kuzey	-	566.64	59.70	19.51	-	-
Doğu	-	437.27	22.53	-	-	-
Güney	-	566.64	60.83	32.41	-	-
Batı	-	423.11	120.45	4.63	-	-

Hesaplamalarda güneş gelme açısının en yüksek olduğu durum gözetilmiştir. Azimut açısı değerinin 0 olduğu güneşe bakan dış çatının kısmı olan Roof1-Zone2 alınmıştır. Roof1-Zone2 bakan çatının güneşe geliş açısına ait görseller Şekil 24 ve Şekil 25’de verilmiştir.



Şekil 24. Kullanılan çatı aralı bina modelindeki Roof1-Zone2 çatısına düşen güneş açısı-1



Şekil 25. Kullanılan çatı aralı bina modelindeki Roof1-Zone2 çatısına düşen güneş açısı-2

4.2. Faz Değiştiren Malzemelerin Özellikleri

Simölasyonu yapılan farklı çatı modelli binalar için her bir modelin Tablo 5’deki belirtilen kalınlıklarına ve erime sıcaklıklarına göre farklı faz değiştiren malzemeler kullanılarak simöl edilmiştir. Faz değiştirilen malzemelerin özellikleri ve ısı verileri kullanılan program DesignBuilder kütüphanesi ve ticari firmaların teknik özelliklerinden elde edilerek kullanılmıştır.

Tablo 5. Faz Değiştiren Malzemelerin Isıl Özellikleri

	Adı	Erime	Yoğunluk	Öz Isı	İletkenlik	Kalınlığı
		Sıcaklığı				
		(°C)	(kg/m ³)	(J/kg.K)	(W/m.K)	(m)
RubithermHC	RT18HC	18	880	2000	0.2	0.01-0.07 kadar
	RT21HC	21	880	2000	0.2	0.01-0.07 kadar
	RT24HC	24	880	2000	0.2	0.01-0.07 kadar
	RT25HC	25	880	2000	0.2	0.01-0.07 kadar
	RT28HC	27	880	2000	0.2	0.01-0.07 kadar
İnfiniteRPCM	RPCM18	19	929.00	3140	0.8150	0.01-0.07 kadar
	RPCM21	22	929.00	3140	0.8150	0.01-0.07 kadar
	RPCM23	24	929.00	3140	0.8150	0.01-0.07 kadar
	RPCM25	26	929.00	3140	0.8150	0.01-0.07 kadar
	RPCM29	30	929.00	3140	0.8150	0.01-0.07 kadar

4.3. Çatı Yüzeyi Isıl Enerji Dengesi

EnergyPlus’ta, bir yüzeyin dışarıya bakan yüzü için kurulan enerji denklemi şu şekildedir (ASHRAE, 2017).

$$q_{SW,abs}'' + q_{LW}'' + q_{conv}'' - q_{cond}'' = 0 \quad (\text{Eşitlik 1})$$

Eşitlik 1 deki $q_{SW,abs}''$ yüzeye absorbe edilen kısa dalga güneş radyasyonu (direct + diffuse) (W/m²), q_{LW}'' net uzun dalga termal radyasyon akısını(W/m²), q_{conv}'' dış yüzey ile ortam arasındaki konvektif ısı akısını(W/m²), q_{cond}'' ise yüzeyden yapı elemanına doğru iletimle geçen ısı akısını(W/m²) ifade eder(ASHRAE, 2017).

Bu denklem, enerji Korunumu ilkesi gereği yüzeye gelen tüm ısı akılarının yüzeyden çıkan akılarla dengelenmesini ifade eder. Buradan enerji korunumu denklemini Eşitlik 1 kendi içinde atığında;

$$q_{SW,abs}'' = \alpha_{sol} \cdot I_{solar} \quad (\text{Eşitlik 2})$$

Eşitlik 2'deki I_{solar} yüzeye gelen toplam güneş radyasyonu (W/m^2), α_{sol} ise güneş absorpsiyon katsayısını (boyutsuz) belirtir (ASHRAE, 2017).

$$q_{LW}'' = h_r(T_{\text{env}} - T_{\text{surf}}) \quad (\text{Eşitlik 3})$$

Eşitlik 3'deki h_r radyasyon ısı transfer katsayısını ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$), T_{env} eşdeğer çevre sıcaklığını (K), T_{surf} ise çatı dış yüzey sıcaklığını (K) ifade eder (ASHRAE, 2017).

$$q_{\text{conv}}'' = h_{\text{out}}(T_{\text{surf}} - T_{\infty}) \quad (\text{Eşitlik 4})$$

Eşitlik 4'deki h_{out} dış yüzey konveksiyon katsayısı ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$), T_{surf} çatı dış yüzey sıcaklığını (K) T_{∞} dış hava sıcaklığını (K) gösterir (ASHRAE, 2017).

$$q_{\text{cond}}'' = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (\text{Eşitlik 5})$$

Eşitlik 5'deki k ısı iletkenliğini ($\text{W/m} \cdot \text{K}$), $\frac{\partial T}{\partial n}$ sıcaklık gradyanı (K/m) olarak belirtir (ASHRAE, 2017).

Faz değiştiren malzemeli bir çatı tabakasında enerji denklemi Eşitlik 6'da belirtilmiştir (ASHRAE, 2017).

$$\rho \frac{\partial h(T)}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (\text{Eşitlik 6})$$

$$\rho_i \frac{h_i^{n+1} - h_i^n}{\Delta t} = k_W \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta x} - k_E \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta x} \quad (\text{Eşitlik 7})$$

Eşitlik 6'da Faz değiştirici malzemeli bir çatı tabakasında ısı enerji depolama denklemi, entalpi-sıcaklık ilişkisini kullanarak tanımlanmıştır. Ayrıca eşitlikte $h(T)$ entalpi hem duyulur hem de gizli ısı etkisini içerir; bu nedenle FDM'de depolanan enerji faz değişimi sırasında artar ve sıcaklık sabit kalabilir. Sonlu fark ayrıklaştırmasıyla (FDM), bu denklem Eşitlik 7 ile şeklinde ifade edilir ve böylece zamanla FDM'de enerji depolama dinamiği çözülebilir (ASHRAE, 2017).

Eşitlik 6'daki ρ Malzeme yoğunluğunu (kg/m^3), $h(T)$ FDM'nin özgül entalpi fonksiyonunu (J/kg), T sıcaklığı (K), k Isı iletkenliği ($\text{W/m} \cdot \text{K}$) belirtirken eşitliğin sol tarafı enerji depolamayı (hem duyulur hem gizli ısı), eşitliğin sağ tarafı ise iletim ısı

akısını gösterir. Eşitlik 7'deki i Düğüm noktalarını, n , $n+1$ zaman adımı indekslerini, Δt zamanı (sn), Δx kalınlığı (m), k_w , k_E ısı iletkenlik değ erlerini, h_i FDM özgül entalpisini ifade eder (ASHRAE, 2017).

4.4. PMV ve PPD Konfor Hesabı:

PMV ve PPD, iç ortam ısı l konforunun nicel olarak değ erlendirilmesinde en yaygın kullanılan iki parametredir. Akademik olarak bunlar, P. O. Fanger tarafından geliştirilen ve ASHRAE Standard 55 ile ISO 7730 standartlarında tanımlanan Fanger konfor modelinin temelini oluşturur (Fanger, 1970; ASHRAE, 2004; ISO, 2005). PMV, bir iç ortamda bulunan büyük bir insan grubunun termal ortamı nasıl algılayacağını istatistiksel olarak tahmin eden ortalama oy değ eridir. PPD, belirli bir termal ortamda bulunan insanların yüzde kaçının konforsuz hissedeceğini tahmin eden bir indekstir (Fanger, 1970). ASHRAE Standard 55 göre PMV termal ölçeğ i aşağıdaki Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. PMV Termal Algı Ölçeğ i (ASHRAE, 2017)

PMV	Termal Algı
+3	Çok sıcak
+2	Sıcak
+1	Hafif sıcak
0	Nötr (konforlu)
-1	Hafif serin
-2	Serin
-3	Çok soğuk

PMV termal ölçeğ ini etkileyen parametreler aşağıda belirtilmiştir.

M: Metabolik oran, (W/m^2)

W: Efektif mekanik güç, (W/m^2)

I_{cl} : Kıyafet yalıtımı, (m^2K/W)

f_{cl} : Kıyafet alan faktörü

T_a : Hava sıcaklığı, ($^{\circ}C$)

T_r : Ortalama radyal sıcaklık, ($^{\circ}C$)

v_{ar} : Hava hızı, (m/s)

P_a : Kısmi buhar basıncı, (Pa)

h_c : Konvektif ısı transfer katsayısı, (W/m^2K)

T_{cl} : Kıyafet yüzey sıcaklığı, ($^{\circ}C$)

Clo biriminin SI birimine dönüşümünde $1\ clo=0.155\ m^2K/W$ kabul edilir.

Tablo 7. Giyim Yalıtımı Tablosu (ASHRAE Standard 55)

Giyim Türü	I _{cl} (clo)	I _{cl} (m ² K/W)
Çıplak (nude)	0.00	0.000
Şort (shorts)	0.06	0.009
Tişört + şort	0.36	0.056
Hafif yazlık kıyafet	0.50	0.078
Tipik yazlık kıyafet	0.60	0.093
Hafif ofis kıyafeti	0.70	0.109
Standart ofis kıyafeti	1.00	0.155
Takım elbise (ceketli)	1.20	0.186
Kışlık kıyafet	1.30–1.50	0.202–0.233
Ağır kışlık dış giyim	1.50–2.00	0.233–0.310

Tablo 8. Metabolik Oran Tablosu (ASHRAE Standard 55)

Aktivite Türü	Met (met)	M (W/m ²)
Uyuma	0.7	40
Yatar pozisyonda dinlenme	0.8	46
Oturma (sessiz, dinlenme)	1.0	58
Oturma (okuma, yazma)	1.0–1.2	58–70
Hafif ofis işi (bilgisayar kullanımı)	1.2	70
Ayakta durma (rahat)	1.2–1.4	70–81
Hafif ev işleri	1.5–2.0	87–116
Yavaş yürüyüş (≈2 km/h)	2.0	116
Normal yürüyüş (≈3–4 km/h)	2.5–3.0	145–174
Hızlı yürüyüş	3.5–4.0	203–232
Ağır fiziksel iş	4.0–6.0	232–348

$$f_{cl} = \begin{cases} 1 + 0,2I_{cl}, & I_{cl} \leq 0,5 \\ 1,05 + 0,1I_{cl}, & I_{cl} > 0,5 \end{cases} \quad (\text{Eşitlik 8})$$

$$T_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W) - I_{cl}[3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl}((T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4) + f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a)] \quad (\text{Eşitlik 9})$$

$$h_c = \max\{2.38 | T_{cl} - T_a |^{0.25}, (12,1 \sqrt{v_{ar}})\} \quad (\text{Eşitlik 10})$$

$$H_{dg} = 3.05 \times 10^{-3} [5733 - 6.99 \cdot (M - W) - P_a] \quad (\text{Eşitlik 11})$$

$$H_{dd} = 0.42[(M - W) - 58.15] \quad (\text{Eşitlik 12})$$

$$H_{resg} = 1.7 \times 10^{-5} M(5867 - P_a) \quad (\text{Eşitlik 13})$$

$$H_{resd} = 0.0014 M(34 - T_a) \quad (\text{Eşitlik 14})$$

$$H_r = 3.9610 - 8f_{cl}[(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] \quad (\text{Eşitlik 15})$$

$$H_c = f_{cl}h_c(T_{cl} - T_a) \quad (\text{Eşitlik 16})$$

Eşitlik 8’de kiyafet alanı faktörü bulunmuştur. Eşitlik 9’daki T_{cl} , kiyafet yüzey sıcaklığı ile Eşitlik 10’daki h_c , konvektif ısı transferi katsayısı denklemleri birbirine bağlıdır ve bu yüzden doğrudan değil, iteratif (tekrarlı) yöntemle çözülür. Eşitlik 11’de H_{dg} ter yoluyla gizli ısı transferi, Eşitlik 12’de H_{dd} deri altı duyulur ısı transferi, Eşitlik 13’de H_{resg} solunumla gizli ısı transferi, Eşitlik 14’de H_{resd} solunumla duyulur ısı transferi, eşitlik 15’de H_r ışınlama ısı transferi ve Eşitlik 16’da H_c konveksiyonla ısı transferi denklemleri kurulmuştur (ISO 7730, 2005).

Tüm bu eşitlikleri kullanarak Eşitlik 17’de belirtilen PMV denklemi kurularak PMV indeks hesabı oluşturulur (ISO 7730, 2005).

$$PMV = [0,303e^{-0,036.M} + 0.028].[(M-W) - H_{dg} - H_{dd} - H_{resg} - H_{resd} - H_r - H_c] \quad (\text{Eşitlik 17})$$

$$PPD = 100 - 95.e^{(-0,03353.PMV^4 - 0,219.PMV^2)} \quad (\text{Eşitlik 18})$$

Eşitlik 17 bulunduktan sonra Eşitlik 18’de PPD hesabı yapılabilir (ASHRAE, 2017).

4.5. CO₂ Emisyon Hesabı

Tüm enerji verimlilikleri hesaplamaları yaparken çevreye salınan CO₂ emisyon değerlerini göz ardı edilmemelidir. CO₂ emisyon değerlerini düşürmek için yapılan çalışmayla ne kadar emisyon azalımı sağlanacağı tespit edilebilir. Tablo 9’ da verilen kullanılan enerji kaynaklarına göre kWh birimine düşen CO₂ miktarını gösterilmiştir.

Tablo 9. Yakıt tiplerine göre kabul edilen CO₂ emisyon faktörü (IPCC, 2006)

CO ₂ Emisyon Faktörü	
CO ₂ kg/kWh	
Kömür	0.433
Fuel-Oil	0.33
Doğalgaz	0.234
Elektrik	0.617

Enerji tüketimine göre CO₂ emisyonu şöyle Eşitlik 19’da belirtilmiştir.

$$E_{CO_2} = E_{kWh} \times EF \quad (\text{Eşitlik 19})$$

Eşitlik 8’de E_{CO_2} CO₂ emisyon azalımı miktarını (CO₂), E_{kWh} geri kazanılan enerjiyi(kWh) ve EF emisyon faktörünü (CO₂ kg/kWh) ifade etmektedir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Teras Çatılı Binada Entegre Edilen Faz Değiştiren Malzemelerin Termal Performanslarının İrdelenmesi

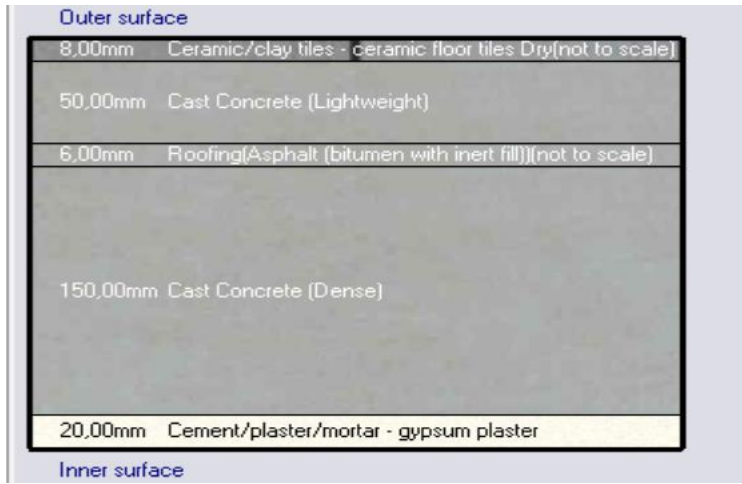
Bu bölümde teras çatılı bina modelindeki çatı katmanına FDM eklenmiştir. Teras çatılı bina modelindeki çatı katmanına eklenen FDM'li ile FDM'siz arasında oluşan termal performanslar irdelenmiştir. Kullanılan RTHC malzemenin erime sıcaklığına göre RT18HC, RT21HC, RT24HC, RT25HC RT25HC ile RPCM malzemenin erime sıcaklığına göre RPCM18C, RPCM21C RPCM23C RPCM25C RPCM29C malzemeleri olmak üzere 10 farklı inceleme yapılmıştır. Yapılan incelemede FDM kombinasyonların 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60mm ve 70mm, kalınlıkları hesaba katarak ayrı ayrı her çatı tipi için 70 ayrı analiz yapılmıştır. Her teras çatı modeli için ayrı ayrı yıllık ve saatlik analizler yapılmıştır. Geniş bir yelpazede yorum yapmaya olanak sağlayan toplamda 210 farklı analiz sonucu elde edilmiştir. Tüm farklı çatı tip modellerinin analiz sonuçlarından yıllık ısıtma soğutma performans sonuç verileri, saatlik ısıtma soğutma performans sonuç verileri ve aylık ısıtma soğutma performans sonuç verileri oluşturulmuştur. Sonuçlar DesignBuilder programı “Simulation” kısmında yıllık saatlik simülasyonu yapılarak “view EnergyPlus results” penceresinden alınmıştır. Daha sonra çatı katmanında FDM kullanılan binanın analiz sonuçları ile çatı katmanında FDM kullanılmayan binanın analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda simülasyonu yapılan binanın program analizlerinden elde edilen ortam sıcaklığı (°C), iç yüzey sıcaklığı (°C), dış yüzey sıcaklığı (°C), çatı sıcaklığı (°C), konfor sıcaklığı (°C) parametrelerinden faydalanılmıştır. FDM'siz ve FDM'li teras çatı tip modelleri için ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyacına etkisinin araştırılması amacıyla analiz sonuçları öncelikle yıllık bazda değerlendirilmiştir.

5.1.1. FDM'siz ve FDM'li Çatı Katmanların Detayları;

DesignBuilder yazılımında yapılan modellemenin, 2024 yılına ait İstanbul iklim verilerine göre Şekil 26, Şekil 27, Şekil 28 ve Şekil 29'da gösterilen çatı katmanlarıyla 4 farklı teras çatı bina modeli belirlenmiştir. Belirlenen çatı katmanlarına arasına öncelikle 1 cm kalınlığındaki RT25HC ve RPCM25 erime sıcaklığına sahip malzemeler eklenerek FDM'siz çatılı binaya göre Tablo 10' da gösterilen verimli çatı tipi modelleri belirlenmiştir.



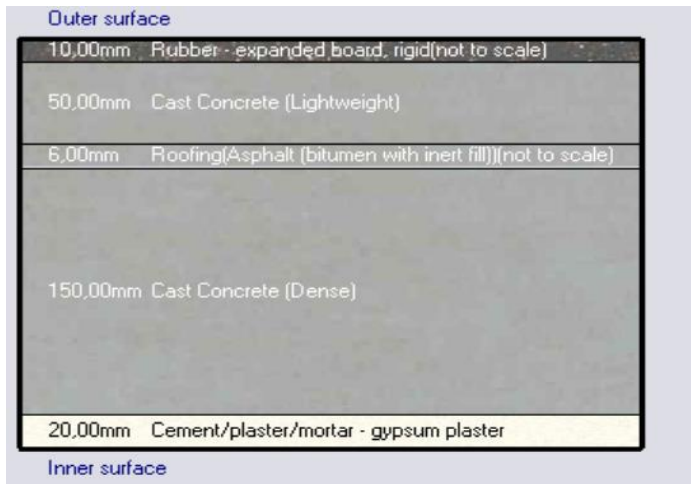
Şekil 26. Teras çatıda belirlenen FDM'siz çatı kesiti tip-1



Şekil 27. Teras çatıda belirlenen FDM'siz çatı kesiti tip-2



Şekil 28. Teras çatıda belirlenen FDM'siz çatı kesiti tip-3



Şekil 29. Teras çatıda belirlenen FDM'siz çatı kesiti tip-4

Tablo 10. FDM'siz teras çatılı bina modelindeki çatı tiplerine göre yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyaçları

		Isıtma	Soğutma
Tip-1	kWh	54527.19	60807,94
Tip-2	kWh	54103.50	62196.25
Tip-3	kWh	52926,84	64291,60
Tip-3a	kWh	52926.84	64291,60
Tip-4	kWh	48348,50	62386.96

Tablo 11. FDM'li teras çatılı bina modelindeki çatı tiplerine göre 25 °C erime sıcaklığında yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyaçları

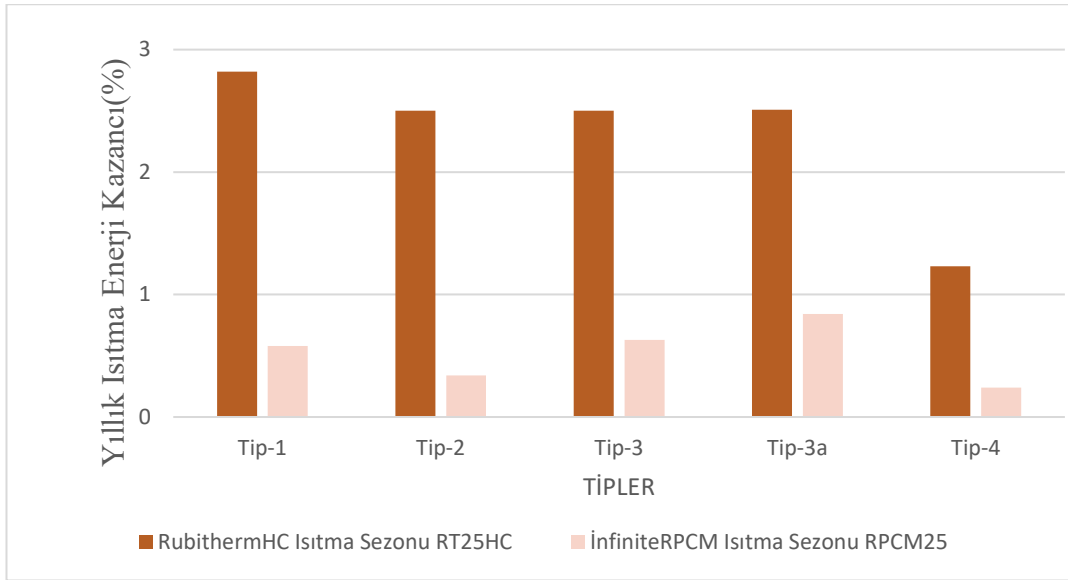
		Isıtma	Soğutma	Isıtma	Soğutma
		RT25HC	RT25HC	RPCM25	RPCM25
Tip-1	kWh	52990.88	60977.86	54210.05	57099.86
	%	2.8175	-0.279	0.5816	6.0980
Tip-2	kWh	52751.86	62277.00	53919.07	59108.38
	%	2.4982	-0.130	0.3409	4.9647
Tip-3	kWh	51601.51	64226.87	52595.64	61027.15
	%	2.5041	0.1007	0.6258	5.0776
Tip-3a	kWh	51596.78	64356.31	52481.72	63779.06
	%	2.5130	-0.101	0.8410	0.7972
Tip-4	kWh	47752.80	62521.46	48232.17	59479.52
	%	1.2321	-0.216	0.2406	4.6603

Bu bölümde yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyaçları için 25°C erime sıcaklığında RTHC ve RPCM malzemelerin Tip-1, Tip-2, Tip-3, Tip-3a ve Tip-4 olarak 5 farklı FDM'li çatı tipi oluşturulmuştur. Daha önce oluşturduğumuz 4 tipi teras çatı tipinden farklı bir senaryo geliştirerek FDM'li katmanı olarak Tip-3a teras çatı tipi oluşturulmuştur. Tablo 10'a bakıldığında Tip-4 FDM'siz teras çatı modeli çatı katmanında binanın yıllık ısıtma enerji ihtiyacı 48348.50 kWh en düşük olduğu tespit

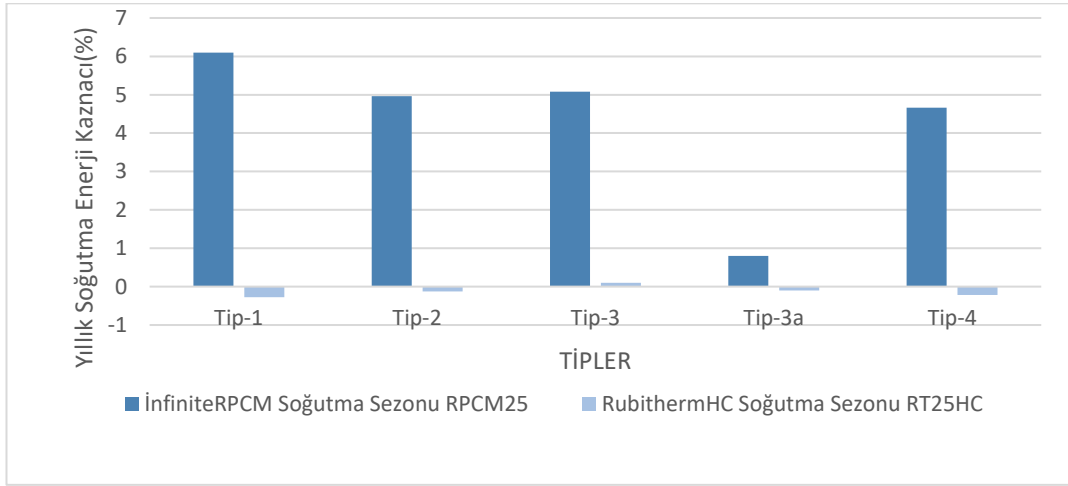
edilmiştir. Ayrıca Tablo 10'a tekrar bakıldığında Tip-1'in FDM'siz teras çatı katmanında binanın yıllık soğutma enerji ihtiyacı 60807.94 kWh en düşük olduğu görülmüştür

Tablo 11 irdelendiğinde 1 cm RPCM25 kombinasyonunda yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı olarak kıyaslama yapılırsa % 2.8175 oranı 52990.88 kWh yıllık ısıtma enerji ihtiyacı ile en yüksek performansı Tip-1'de bulunmuştur. % 1.2321 oranı 47752.80 kWh yıllık ısıtma enerji ihtiyacı ile en düşük performansı Tip-4'de göstermiştir. Tip-3 çatı modelinden yeni oluşturulan Tip-3a, FDM malzemenin dış yüzeye katmana 1 katman daha yakın olmasıyla yıllık ısıtma enerji ihtiyacı 51601.51 kWh'den 51596.78 kWh düşmüş, verim olarak % 2,5041' den % 2.5130' e yükselmiştir. 1 cm RPCM25 kombinasyonunda yıllık soğutma enerji ihtiyacı olarak kıyaslama yapılırsa % 0.1007 oranı 64226.87 kWh yıllık soğutma enerji ihtiyacı ile en yüksek performansı, Tip-3'de göstermiştir. % -0.2794 oranı 60977.86 kW/h yıllık soğutma enerji ihtiyacı ile Tip-1'de en verimsiz performansı bulunmuştur. Tip-3 çatı modelinden oluşturulan Tip-3a modeli, FDM'nin dış yüzey katmanına 1 katman daha yakın olmasıyla yıllık soğutma enerji ihtiyacı 64226.87 kWh'den 64356.31 kWh'e yükselmiştir.

1 cm RPCM25 kombinasyonunda yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı olarak kıyaslama yapılırsa % 0.8410 oranı 52481.72 kWh enerji ihtiyacı ile en yüksek performansı Tip-3a'da görülmüştür. % 0.2406 oranı 48232.17 kWh yıllık ısıtma enerji ihtiyacı ile en düşük performansı Tip-4'de göstermiştir. Tip-3 çatı modelinden yeni oluşturulan Tip-3a, Tablo 12' de FDM malzemenin dış yüzey katmanına 1 katman daha yakın olmasıyla yıllık ısıtma enerji ihtiyacı 52595.64 kWh'dan 52481.72 kWh düşmüş, verim olarak % 0.6258' den % 0.8410' a yükselmiştir. 1 cm RPCM25 kombinasyonunda yıllık soğutma enerji ihtiyacı olarak kıyaslama yapılırsa % 6.0980 oranı 57099.86 kWh enerji ihtiyacı ile en yüksek performansı Tip-1'de bulunmuştur. % 0.7972 oranı 63779.06 kWh yıllık soğutma enerji ihtiyacı ile Tip-3a'da en düşük performansı tespit edilmiştir. Tip-3 çatı modelinden yeni oluşturulan Tip-3a, Tablo 10'da ifade edildiği gibi FDM'nin dış yüzey katmanına 1 katman daha yakın olmasıyla yıllık soğutma enerji ihtiyacı 61027.15 kWh'dan 63779.06 kWh'a yükselmiş, verim olarak % 5.0776'dan % 0.7972'ye düşerek verimsiz hale gelmiştir.



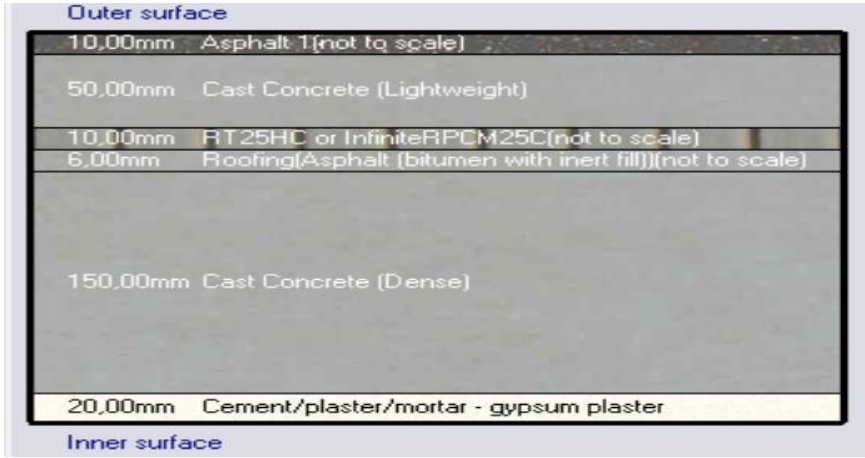
Şekil 30. RT25HC ve RPCM25C entegre teras çatılı bina modelindeki çatı tiplerine göre yıllık ısıtma enerjisi kazancı



Şekil 31. RT25HC ve RPCM25C entegre teras çatılı bina modelindeki çatı tiplerine göre yıllık soğutma enerjisi kazancı

Sonuç olarak bu bölümdeki çalışma teras çatı tipi olarak en verimli 3 farklı çatı tipine indirgenmiştir. Çalışmalar sonucunda Tablo 10, Tablo 11, Şekil 30 ve Şekil 31'e bakıldığında yıllık ısıtma enerji ihtiyacında RT25HC'nin RPCM25C göre daha verimli olduğu, yıllık soğutma enerji ihtiyacında RPCM25C'nin RT25HC göre daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Tablo 10, Tablo 11, Şekil 31 ve Şekil 32'de görüldüğü gibi Tip-1 yıllık ısıtma enerji ihtiyacı olarak RT25HC'nin ve yıllık soğutma enerji ihtiyacı olarak RPCM25C'nin en verim tipi olduğu görülmüştür. Yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyacı olarak her iki fonksiyonu ele alırsak Tip-3 ve Tip-3a'nın farklı erime sıcaklık ve kalınlıklarda daha verimli hale geleceği öngörülmüştür. Bu yüzden farklı erime sıcaklık ve kalınlıklara geçmeden önce 5 farklı teras çatı tipi modellerini 3 farklı teras çatı tipine indirgenmiştir. Bunlar Tip-1, Tip-3 ve Tip-3a olarak belirlenmiştir. Seçilen çatı tipleri

aşağıdaki Şekil 32, Şekil 33 ve Şekil 34’de görüldüğü gibi daha önceki Tip-3 Tip-1’e, Tip-3a Tip-2’ye ve Tip-1 Tip-3’e dönüştürülmüştür.



Şekil 32. Teras çatıda belirlenen FDM’li çatı kesiti tip-1



Şekil 33. Teras çatıda belirlenen FDM’li çatı kesiti tip-2



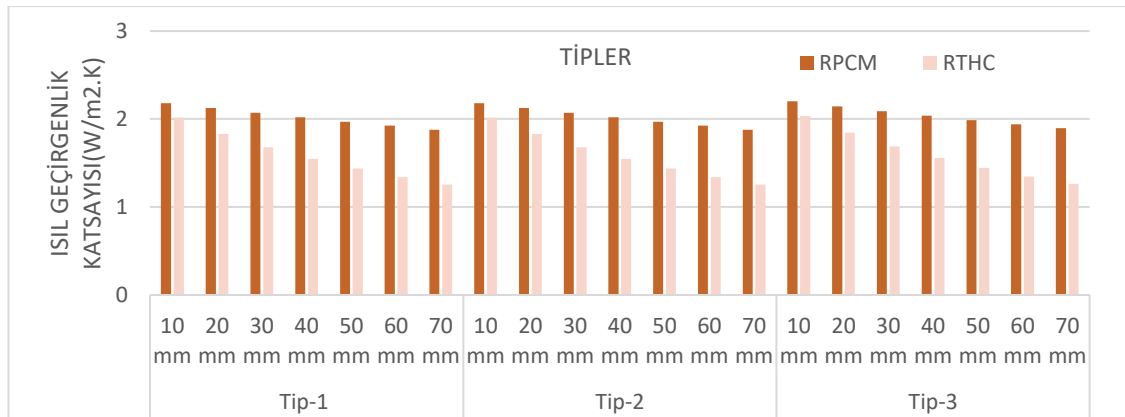
Şekil 34. Teras çatıda belirlenen FDM’li çatı kesiti tip-3

Simulasyon sonuçlarına göre seçilen en verimli 3 farklı çatı tipi seçilmiştir. Seçilen Tip-1 de en üst katmanda asfalt malzemesi kullanılmıştır. FDM ise çimento esaslı şap

malzemesi ile bitümlü mebran arasına eklenmiştir. Tip-2 de ise en üst katmanda asfalt malzemesi girilmiştir. FDM ise en üst katmanda olan asfalt malzeme ile çimento esaslı şap malzemesi arasına eklenmiştir. Tip-3 de bu kez dış katmanı seramik olan FDM'nin de en iç katman olan alçı sıva ile betonarme döşeme arasına eklenmiştir.

Tablo 12. RTHC entegre çatı tiplerin kalınlık ve erime sıcaklığına göre ısı geçirgenlik katsayısı

		FDMsiz	RT18HC	RT21HC	RT24HC	RT25HC	RT28HC
Tip-1	10 mm (W/m2.K)	2.241	2.015	2.015	2.015	2.015	2.015
	20 mm (W/m2.K)	2.241	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831
	30 mm (W/m2.K)	2.241	1.677	1.677	1.677	1.677	1.677
	40 mm (W/m2.K)	2.241	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548
	50 mm (W/m2.K)	2.241	1.436	1.436	1.436	1.436	1.436
	60 mm (W/m2.K)	2.241	1.340	1.340	1.340	1.340	1.340
	70 mm (W/m2.K)	2.241	1.256	1.256	1.256	1.256	1.256
Tip-2	10 mm (W/m2.K)	2.241	2.015	2.015	2.015	2.015	2.015
	20 mm (W/m2.K)	2.241	1.831	1.831	1.831	1.831	1.831
	30 mm (W/m2.K)	2.241	1.677	1.677	1.677	1.677	1.677
	40 mm (W/m2.K)	2.241	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548
	50 mm (W/m2.K)	2.241	1.436	1.436	1.436	1.436	1.436
	60 mm (W/m2.K)	2.241	1.340	1.340	1.340	1.340	1.340
	70 mm (W/m2.K)	2.241	1.256	1.256	1.256	1.256	1.256
Tip-3	10 mm (W/m2.K)	2.263	2.033	2.033	2.033	2.033	2.033
	20 mm (W/m2.K)	2.263	1.845	1.845	1.845	1.845	1.845
	30 mm (W/m2.K)	2.263	1.690	1.690	1.690	1.690	1.690
	40 mm (W/m2.K)	2.263	1.558	1.558	1.558	1.558	1.558
	50 mm (W/m2.K)	2.263	1.445	1.445	1.445	1.445	1.445
	60 mm (W/m2.K)	2.263	1.348	1.348	1.348	1.348	1.348
	70 mm (W/m2.K)	2.263	1.263	1.263	1.263	1.263	1.263



Şekil 35. FDM'li malzemelli teras çatıda tiplere ve kalınlıklara göre ısı geçirgenlik katsayısı

Tablo 13. RPCM entegre çatı tiplerin kalınlık ve erime sıcaklığına göre ısı geçirgenlik katsayısı

			FDMsiz	RPCM18C	RPCM21C	RPCM23C	RPCM25C	RPCM29C
Tip-1	10 mm	(W/m2.K)	2.241	2.181	2.181	2.181	2.181	2.181
	20 mm	(W/m2.K)	2.241	2.124	2.124	2.124	2.124	2.124
	30 mm	(W/m2.K)	2.241	2,070	2,070	2,070	2,070	2,070
	40 mm	(W/m2.K)	2.241	2.019	2.019	2.019	2.019	2.019
	50 mm	(W/m2.K)	2.241	1.970	1.970	1.970	1.970	1.970
	60 mm	(W/m2.K)	2.241	1.924	1.924	1.924	1.924	1.924
	70 mm	(W/m2.K)	2.241	1.879	1.879	1.879	1.879	1.879
Tip-2	10 mm	(W/m2.K)	2.241	2.181	2.181	2.181	2.181	2.181
	20 mm	(W/m2.K)	2.241	2.124	2.124	2.124	2.124	2.124
	30 mm	(W/m2.K)	2.241	2,070	2,070	2,070	2,070	2,070
	40 mm	(W/m2.K)	2.241	2.019	2.019	2.019	2.019	2.019
	50 mm	(W/m2.K)	2.241	1.970	1.970	1.970	1.970	1.970
	60 mm	(W/m2.K)	2.241	1.924	1.924	1.924	1.924	1.924
	70 mm	(W/m2.K)	2.241	1.879	1.879	1.879	1.879	1.879
Tip-3	10 mm	(W/m2.K)	2.263	2.202	2.202	2.202	2.202	2.202
	20 mm	(W/m2.K)	2.263	2.144	2.144	2.144	2.144	2.144
	30 mm	(W/m2.K)	2.263	2.089	2.089	2.089	2.089	2.089
	40 mm	(W/m2.K)	2.263	2.037	2.037	2.037	2.037	2.037
	50 mm	(W/m2.K)	2.263	1.987	1.987	1.987	1.987	1.987
	60 mm	(W/m2.K)	2.263	1.940	1.940	1.940	1.940	1.940
	70 mm	(W/m2.K)	2.263	1.895	1.895	1.895	1.895	1.895

Bu bölümdeki çalışma belirlenen Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 olmak üzere 3 farklı teras çatı modelindeki malzemelerin ısı iletkenlik katsayısını(k), ısı geçirgenlik dirençleri(R) incelenmiştir. FDM'siz ve FDM'li tiplerde ısı geçirgenlik katsayısına(U) bakılmıştır.

Tablo 12 ve Tablo 13 incelendiğinde FDM'siz Tip-1 ve Tip-2'deki asfalt malzemesinin ısı iletkenlik dirençleri(R), FDM'siz Tip-3'deki seramik malzemesinin ısı iletkenlik direncinden(R) yüksek olduğu görülmüştür. Buradan da FDM'siz Tip-1 ve Tip-2 ısı geçirgenlik katsayısı(U), FDM'siz Tip-3 ısı geçirgenlik katsayısından (U) daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca Tablo 12 ve Tablo 13'de görüldüğü üzere FDM'li Tip-1, Tip-2 ve Tip-3'ün FDM'siz Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 göre ısı geçirgenlik katsayılarını(U) iyileştirdiği tespit edilmiştir.

Tablo 12, Tablo 13 ve Şekil 35'e bakılırsa RPCM ve RTHC entegreli teras çatılı farklı tip modelleri ve kalınlıklarındaki ısı geçirgenlik katsayıları(U), yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca FDM'li teras çatı tipi olarak 70 mm kalınlığıyla RTHC entegreli 1.256 W/m2.K en düşük ısı geçirgenlik katsayısı Tip-1 ve Tip-2'de olduğu bulunmuştur.

10 mm kalınlığıyla RPCM entegreli 2.202 W/m².K en yüksek ısıl geçirgenlik katsayısı Tip-3’de olduğu görülmektedir. RTHC FDM’li ile RPCM FDM’li teras çatı tip modellerinde ısıl geçirgenlik katsayısı(U) faz değıştiren malzemenin erime sıcaklıklarına göre bir değışkenlik olmamıştır. FDM’li çatı tiplerinde ısıl iletkenlik katsayısının(k) erime sıcaklığıyla aynı kaldığı anlaşılmaktadır.

5.1.2. RTHC ve RPCM Faz Değıştiren Malzemelerin Belirlenen Teras Çatılı Tip-1 Bina Modelinde Yıllık Isıtma ve Soğutma Enerji Performanslarının İncelenmesi

Buradan yapılan çalışma teras çatılı Tip-1 bina modelinde RTHC malzemenin RT18HC, RT21HC, RT24HC, RT25HC ve RT28HC farklı erime sıcaklıkları ile RPCM malzemenin RPCM18C, RPCM21C, RPCM23C, RPCM25C ve RPCM29C farklı erime sıcaklıklarına bakılmıştır. Bakılan erime sıcaklıklarına göre kendi içlerinde 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm ve 70 mm kalınlıklarında olmak üzere ısıtma ve soğutma enerji ihtiyaçlarının saatlik, aylık, yıllık performansları incelenmiştir. Her bir kalınlık ve her bir erime sıcaklığı için toplamda 70 farklı analiz yapılmıştır.

Tablo 14. RTHC ve RPCM entegreli tip-1 teras çatılı bina modelinde erime sıcaklığına göre yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyacı(kWh)

		RT18HC	RT21HC	RT24HC	RT25HC	RT28HC	
RubithermHC için	Isıtma	10 mm	50991.39	51594.86	51602,11	51601.51	51603.69
		20 mm	49375.27	50485.41	50496.28	50495.27	50493.8
		30 mm	47965.92	49546.47	49548.34	49547.6	49553.55
		40 mm	46847.22	48744.2	48743.06	48741,53	48738.31
		50 mm	45835.3	48033.83	48042.11	48035.63	48034.68
		60 mm	44971.27	47418.88	47434.47	47439.29	47443.42
		70 mm	44213.46	46861.62	46878.22	46871.08	46868.26
	Soğutma	10 mm	64120.88	64234.88	64228.04	64226.87	64588.97
		20 mm	64011.95	64253	64276.7	64278.17	63519.55
		30 mm	63956.7	64287.71	64314.88	64326.64	64320.38
		40 mm	63927.18	64329.6	64372.73	64372.74	64201.21
		50 mm	63915.7	64373.93	64438.98	64423.29	64662.66
		60 mm	63932.85	64430.41	64500.05	64482.62	64332.45
		70 mm	63979.04	64493.77	64569.35	64552.15	64401.57

Tablo 14.(Devamı)

		RPCM18C	RPCM 21C	RPCM 23C	RPCM 25C	RPCM 29C	
İnfiniteRPCM için	Isıtma	10 mm	51610.44	52363.98	52508.05	52595,64	52672,14
		20 mm	50595.43	51671.25	51671.25	52255.2	52715.08
		30 mm	50074.03	51071.06	51575.67	52027.22	52491.68
		40 mm	48848.98	50627.86	50769.92	52104.84	52237.85
		50 mm	48404.74	50015.21	50829.3	51702.78	51980.84
		60 mm	48048.33	49462.66	50425,15	51412.88	51730.89
		70 mm	47541.83	49017.74	50066.78	51145.79	51495.6
	Soğutma	10 mm	63800.83	62885.23	61910.64	61027.16	65207.12
		20 mm	63401.33	61806.17	61806.17	58701.05	66078.75
		30 mm	63031.32	60562.73	57849.07	58538.06	66421.41
		40 mm	62135.54	59347.71	55168.76	58975.59	66546.53
		50 mm	61836.61	58468.34	55511.74	59059.35	67095.14
		60 mm	61468.32	57815.97	55630.68	59152.33	67243.61
		70 mm	61001.19	56411.36	55742.88	59231.18	67257.12

Tablo 15. RTHC ve RPCM entegreli tip-1 teras çatılı bina modelinde erime sıcaklığına göre yıllık ısıtma ve soğutma enerji kazançları(%)

		RT18HC	RT21HC	RT24HC	RT25HC	RT28HC	
RubithermHC için	Isıtma	10 mm	3.657	2.517	2.503	2.504	2.500
		20 mm	6.710	4.613	4.592	4.594	4.597
		30 mm	9.373	6.387	6.383	6.385	6.373
		40 mm	11.487	7.903	7.905	7.908	7.914
		50 mm	13.399	9.245	9.229	9.241	9,243
		60 mm	15.031	10.407	10.377	10.368	10.360
		70 mm	16.463	11.460	11.428	11.442	11.447
	Soğutma	10 mm	0.003	0,088	0,099	0.101	-0.463
		20 mm	0.435	0,060	0.023	0.021	1.201
		30 mm	0.521	0.006	-0.036	-0.055	-0.045
		40 mm	0.567	-0.059	-0.126	-0.126	0.141
		50 mm	0.585	-0.128	-0.229	-0.205	-0.577
		60 mm	0.558	-0.216	-0.324	-0.297	-0.064
		70 mm	0.486	-0.314	-0.432	-0.405	-0.171

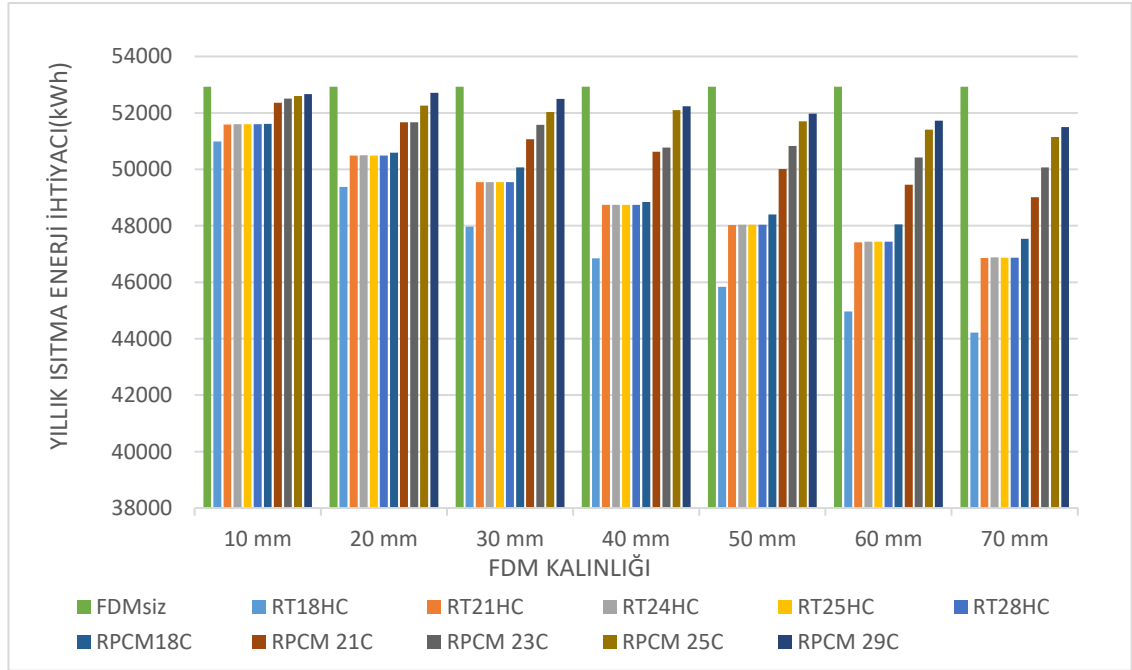
Tablo 15.(Devamı)

		RPCM18C	RPCM 21C	RPCM 23C	RPCM 25C	RPCM 29C	
İnfiniteRPCM için	Isıtma	10 mm	2.487	1.063	0.791	0.626	0.481
		20 mm	4.405	2.372	2.372	1.269	0.400
		30 mm	5.390	3.506	2.553	1.700	0.822
		40 mm	7.705	4.344	4.075	1.553	1.302
		50 mm	8.544	5.501	3.963	2.313	1.787
		60 mm	9.217	6.545	4.727	2.860	2.260
		70 mm	10.174	7.386	5.404	3.365	2.704
	Soğutma	10 mm	0.763	2.187	3.703	5.078	-1.424
		20 mm	1.385	3.866	3.866	8.696	-2.780
		30 mm	1.960	5.800	10.021	8.949	-3.13
		40 mm	3.354	7.690	14.190	8.269	-3.507
		50 mm	3.819	9.058	13.656	8.138	-4.361
		60 mm	4.391	10.072	13.471	7.994	-4.592
		70 mm	5.118	12.257	13.297	7.871	-4.613

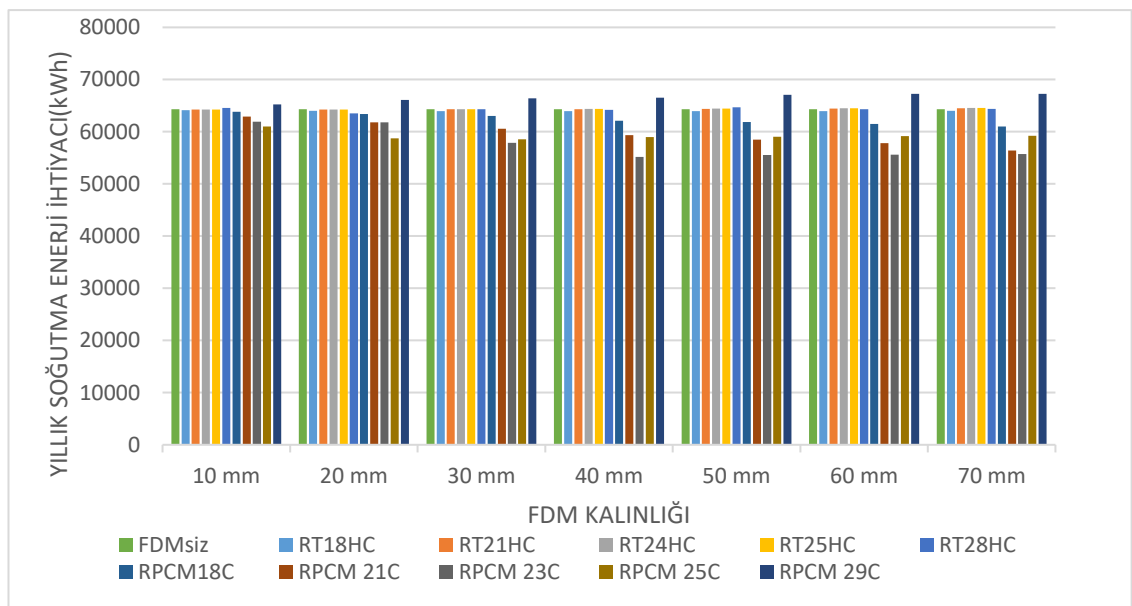
Tablo 14 ve Tablo 15'e bakıldığında Tip-1 teras çatılı bina modelinde yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı için 70 mm RT18HC kombinasyonun 44213.46 kWh enerji ihtiyacı % 16.463 oranla enerji performansı kazançlı çıktığı görülmektedir. Yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı için RT18HC, RT21HC, RT24HC, RT25HC ve RT28HC kombinasyonları, aynı erime sıcaklığındaki farklı kalınlığa göre lineer bir şekilde ısıtma enerji ihtiyacı düşmüştür. Isıtma enerji kazanç yüzdesi olarak artmıştır. Aynı durumun soğutma enerji ihtiyacında olmadığı hatta RT18HC kombinasyonun kalınlığa göre ihmal edilecek oranda olsa bile lineer olarak artmıştır. Tip-1 teras çatılı bina modelindeki RPCM18C(70 mm) kombinasyonunda yıllık 47541.83 kWh ısıtma enerji ihtiyacı % 10.174 oranla en yüksek ısıtma enerji performansını gerçekleştirmiştir. Buradan yola çıkarak RT18HC ve RPCM18HC malzemelerin yıllık ısıtma enerji performansları diğer erime sıcaklığındaki faz değiştiren malzemelere göre daha verimli olduğu bulunmuştur.

Tablo 14 ve Tablo 15 incelendiğinde Tip-1 teras çatılı bina modelinde yıllık soğutma enerji ihtiyacı için 40 mm RPCM23C kombinasyonun yıllık 55168.76 kWh enerji ihtiyacı % 14.190 oranla en kazançlı çıktığı tespit edilmiştir. Yıllık soğutma enerji ihtiyacı için RPCM18HC ve RPCM21C kombinasyonları, aynı erime sıcaklığındaki farklı kalınlığa göre lineer bir şekilde soğutma enerji ihtiyacı azaldığı, enerji kazanç yüzdesi olarak artmıştır. RPCM23C, RPCM25C ve RPCM29C kombinasyonların kalınlığa göre lineerlik sağlanmadığı anlaşılmaktadır.

Şekil 36’da gösterildiği gibi yıllık ısıtma enerji ihtiyacı kalınlık artıkça tüm erime sıcaklıklarında enerji ihtiyacı azalmaktadır. Ayrıca Şekil 37’ye bakılırsa yıllık soğutma enerji ihtiyacı RPCM25C, RPCM29C, RT18HC, RT21HC, RT24HC, RT25HC ve RT28HC kombinasyonları ihmal edilecek kadar verimsiz olduğu görülmektedir. RPCM23C malzemenin 40 mm kalınlığındaki yıllık soğutma enerji ihtiyacı en verimli olarak görülmüştür. 50 mm, 60 mm ve 70 mm kalınlıklarında enerji kazancı, kalınlığa göre düşüş göstermiştir.

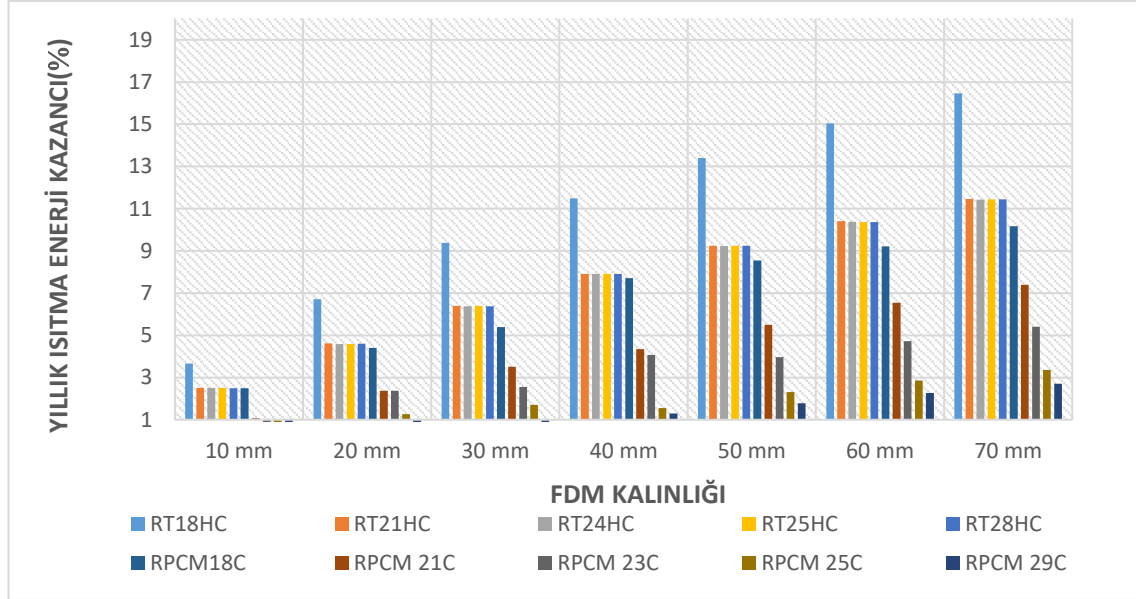


Şekil 36. Tip-1’deki teras çatılı bina modelinde FDM’siz ve FDM’li katmanların yıllık ısıtma enerji ihtiyacı

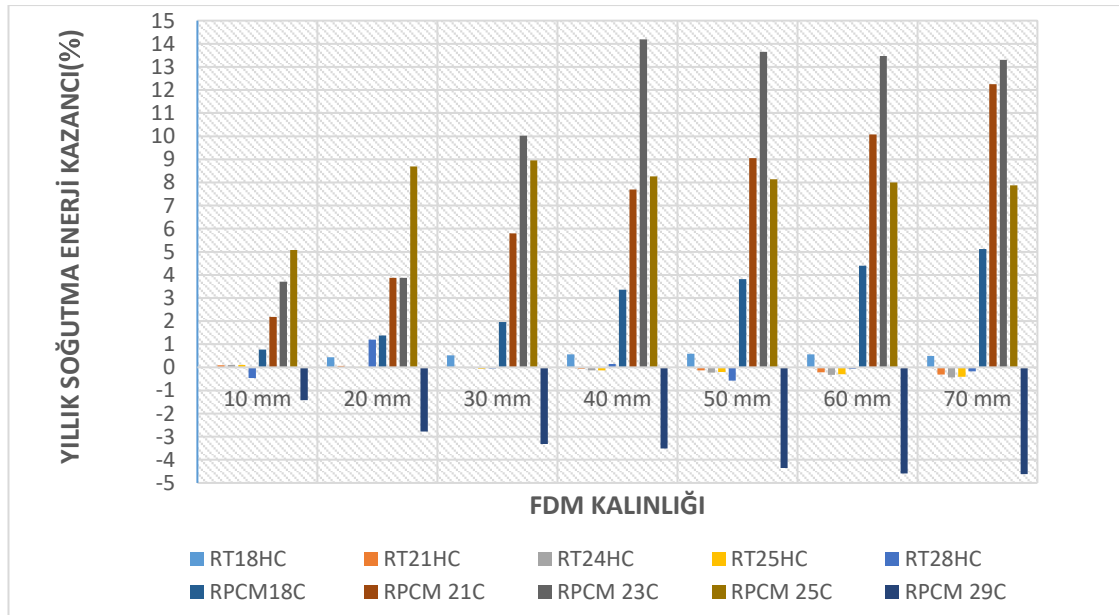


Şekil 37. Tip-1’deki teras çatılı bina modelinde FDM’siz ve FDM’li katmanların yıllık soğutma enerji ihtiyacı

Sonuç olarak Tip-1 teras çatılı bina modelinde RTHC ile RPCM faz değiştiren malzemelerin yıllık ısıtma ve soğutma enerji kazançları olarak farklı etkiler bırakmıştır. RT18HC, RT21HC, RT24HC, RT25HC ve RT28HC kombinasyonları yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacında daha verimli etki gösterirken yıllık soğutma enerji ihtiyacı için aynı etkiyi gösterememiştir. RPCM18HC, RPCM21C, RPCM23C, RPCM25C yıllık soğutma enerji ihtiyacı için verimli durum oluştururken, yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı için aynı etki etmemiştir. Bu durum Şekil 38 ve Şekil 39'a bakılarak daha iyi anlaşılmaktadır.



Şekil 38. Tip-1'deki teras çatılı bina modelinde FDM'li katmanların yıllık ısıtma enerji kazançları



Şekil 39. Tip-1'deki teras çatılı bina modelinde FDM'li katmanların yıllık soğutma enerji kazançları

5.1.3. RTHC ve RPCM Faz Değiştiren Malzemelerin Teras Çatılı Tip-2 Bina Modelinde Yıllık Isıtma ve Soğutma Enerji Performanslarının İncelenmesi

Buradan yapılan çalışma teras çatılı Tip-2 bina modelinde RTHC malzemenin RT18HC, RT21HC, RT24HC, RT25HC ve RT28HC farklı erime sıcaklıkları ile RPCM malzemenin RPCM18C, RPCM21C, RPCM23C, RPCM25C ve RPCM 29C farklı erime sıcaklıklarına bakılmıştır. Bakılan erime sıcaklıklarına göre kendi içlerinde 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm ve 70 mm kalınlıklarında olmak üzere ısıtma ve soğutma enerji ihtiyaçlarının, saatlik, aylık, yıllık enerji performansları incelenmiştir. Her bir kalınlık ve her bir erime sıcaklığı için toplamda 70 farklı analiz yapılmıştır.

Tablo 16. RTHC ve RPCM entegreli tip-2 teras çatılı bina modelinde erime sıcaklığına göre yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyacı(kWh)

		RT18HC	RT21HC	RT24HC	RT25HC	RT28HC	
RubithermHC için	Isıtma	10 mm	51175.43	51592.66	51595.46	51596.78	51594.64
		20 mm	49619.52	50486.96	50491.04	50489.71	50491.4
		30 mm	48383.3	49549.59	49553.72	49551.57	49558.36
		40 mm	47171.57	48743.79	48740.61	48737.72	48753.29
		50 mm	46262.96	48044.55	48042.48	48038.91	48051.48
		60 mm	45425.86	47428.89	47434.61	47435.5	47431.43
		70 mm	44640.92	46871.97	46879.81	46873.22	46879.32
	Soğutma	10 mm	63952.55	64292.74	64336.1	64356.31	64060.05
		20 mm	63772.1	64363.14	64450.05	64484.64	64691.04
		30 mm	63699.45	64414.41	64530.51	64560.76	63978.44
		40 mm	63685.10	64472.48	64580.89	64632.39	63504.5
		50 mm	63701.23	64520.54	64655.62	64685.81	63925.05
		60 mm	63744.28	64584.66	64715.64	64739.95	63932.89
		70 mm	63804.74	64641.99	64758.71	64776.3	64474.11
		RPCM18C	RPCM 21C	RPCM 23C	RPCM 25C	RPCM 29C	
İnfiniteRPM için	Isıtma	10 mm	51784.78	52140.19	52327.29	52481.72	52718.4
		20 mm	50830.73	51561.19	51561.19	52174.69	52510.54
		30 mm	50213.54	51087.23	51523.09	51936.99	52337.86
		40 mm	49902.44	50354.98	51317.95	51707.17	52184.3
		50 mm	49490.88	50053.62	50824.07	51901.2	51965.6
		60 mm	49154.65	49833.23	50631.12	51639.83	51745.19
		70 mm	48810.68	49558.12	50732.98	51369.39	51528.1

Tablo 16.(Devamı)

		RPCM18C	RPCM 21C	RPCM 23C	RPCM 25C	RPCM 29C	
İnfiniteRPM için	Soğutma	10 mm	63488.5	63189.55	63200.19	63779.06	64879.81
		20 mm	62805.98	61749.13	61749.13	62126.39	65438.11
		30 mm	62018.59	60051.67	58657.86	60415.75	65705.51
		40 mm	61665.67	58943.6	57361.96	60104.77	66344.49
		50 mm	61184.24	57005.09	57244.14	60491.76	66604.89
		60 mm	60750.8	55899.83	57312.32	60598.38	66779.77
		70 mm	60824.85	54958.16	57712.18	60677.94	66940.55

Tablo 17. RTHC ve RPCM entegreli tip-2 teras çatılı bina modelinde erime sıcaklığına göre yıllık ısıtma ve soğutma enerji kazançları(%)

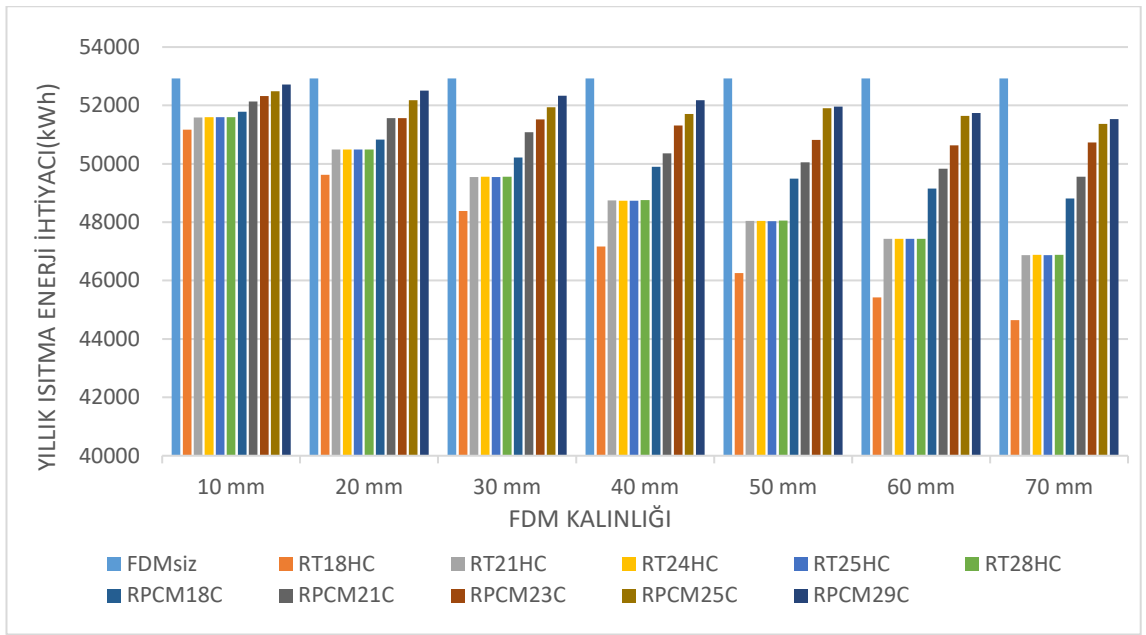
		RT18HC	RT21HC	RT24HC	RT25HC	RT28HC	
RubithermHC için	Isıtma	10 mm	3.309	2.521	2.516	2.513	2.517
		20 mm	6.249	4.610	4.602	4.605	4.602
		30 mm	8.585	6.381	6.373	6.377	6.364
		40 mm	10.874	7.903	7.909	7.915	7.886
		50 mm	12.591	9.225	9.229	9.235	9.212
		60 mm	14.172	10.388	10.377	10.375	10.383
		70 mm	15.655	11.440	11.425	11.438	11.426
	Soğutma	10 mm	0.527	-0.002	-0.069	-0.101	0.360
		20 mm	0.808	-0.111	-0.246	-0.300	-0.621
		30 mm	0.921	-0.191	-0.372	-0.419	0.487
		40 mm	0.943	-0.281	-0.450	-0.530	1.224
		50 mm	0.918	-0.356	-0.566	-0.613	0.570
		60 mm	0.851	-0.456	-0.660	-0.697	0.558
		70 mm	0.757	-0.545	-0.727	-0.754	-0.284
		RPCM18C	RPCM 21C	RPCM 23C	RPCM 25C	RPCM 29C	
İnfiniteRPCM için	Isıtma	10 mm	2.158	1.486	1.133	0.841	0.394
		20 mm	3.960	2.580	2.580	1.421	0.787
		30 mm	5.127	3.476	2.652	1.870	1.113
		40 mm	5.714	4.859	3.040	2.304	1.403
		50 mm	6.492	5.429	3.973	1.938	1.816
		60 mm	7.127	5.845	4.338	2.432	2.233
		70 mm	7.777	6.365	4.145	2.943	2.643

Tablo 17.(Devamı)

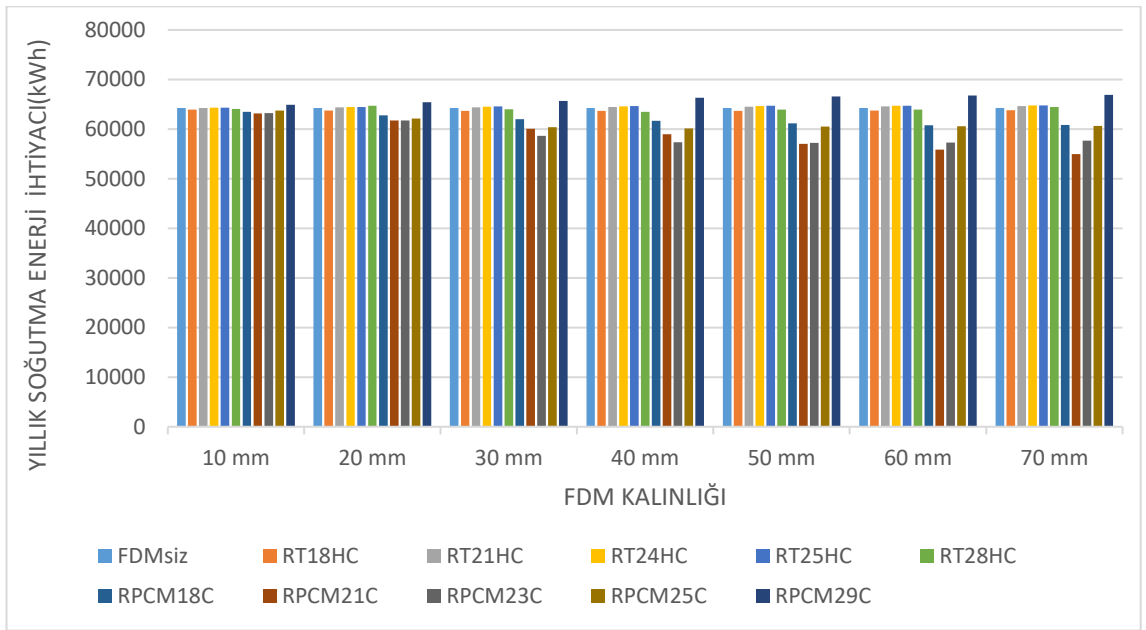
		RPCM18C	RPCM 21C	RPCM 23C	RPCM 25C	RPCM 29C	
İnfiniteRPCM için	Soğutma	10 mm	1.249	1.714	1.698	0.797	-0.915
		20 mm	2.311	3.955	3.955	3.368	-1.783
		30 mm	3.535	6.595	8.763	6.029	-2.199
		40 mm	4.084	8.318	10.778	6.512	-3.193
		50 mm	4.833	11.334	10.962	5.910	-3.598
		60 mm	5.507	13.053	10.856	5.744	-3.870
		70 mm	5.392	14.517	10.234	5.621	-4.120

Tablo 16 ve Tablo 17’ye bakıldığında Tip-2 teras çatılı bina modelinde yıllık ısıtma enerji ihtiyacı için 70 mm RT18HC kombinasyonun yıllık 44640.92 kWh enerji ihtiyacı % 15.655 oranla ısıtma enerji performansı, kazançlı çıktığı görülmektedir. Yıllık ısıtma enerji ihtiyacı için RTHC malzemenin RT18HC, RT21HC, RT24HC, RT25HC ve RT28HC kombinasyonları, aynı erime sıcaklığındaki farklı kalınlığa göre lineer şekilde ısıtma enerji ihtiyacı düşmüştür. Enerji kazanç yüzdesi olarak artmıştır. Aynı durumun soğutma enerji ihtiyacında olmadığı hatta RT18HC kombinasyonu ihmal edilecek kadar verimli olduğu, diğer RT21HC, RT24HC, RT25HC ve RT28HC kombinasyonların verimsiz olduğu anlaşılmaktadır. Tip-2 teras çatılı bina modelin RPCM18HC, RPCM21C, RPCM23C, RPCM25C ve RPCM29C kombinasyonları içerisindeki RPCM18C(70 mm) kombinasyonda yıllık 48810.68 kWh ısıtma enerji ihtiyacı % 7.777 oranla en yüksek ısıtma enerji performansı olarak bulunmuştur. Buradan yola çıkarak RT18HC ve RPCM18HC malzemelerin yıllık ısıtma enerji performansları diğer erime sıcaklığındaki faz değiştiren malzemelere göre daha verimli olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 16 ve Tablo 17 irdelendiğinde Tip-2 teras çatılı bina modelinde yıllık soğutma enerji ihtiyacı için RPCM21C(70 mm) kombinasyonu yıllık 54958.16 kWh soğutma enerji ihtiyacı % 14.517 oranla soğutma enerji performansı kazançlı çıktığı tespit edilmiştir. Yıllık soğutma enerji ihtiyacı için RPCM malzemenin RPCM18HC ve RPCM21C kombinasyonları, aynı erime sıcaklığındaki farklı kalınlığa göre lineer bir şekilde soğutma enerji ihtiyacı düşmüştür. Enerji kazanç yüzdesi olarak artmıştır. RPCM23C, RPCM25C ve RPCM29C kombinasyonları kalınlığa göre lineerlik sağlanmadığı anlaşılmaktadır.

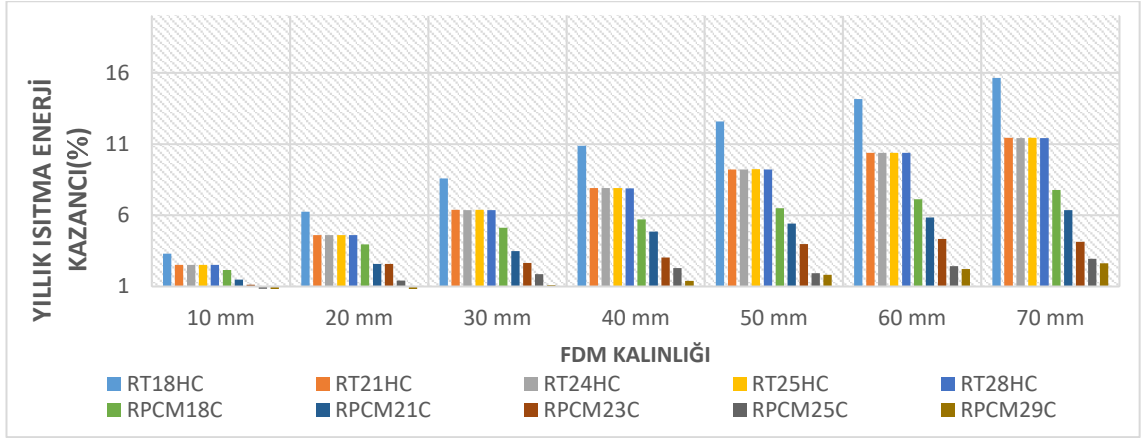


Şekil 40. Tip-2'deki teras çatılı bina modelinde FDM'siz ve FDM'li katmanların yıllık ısıtma enerji ihtiyacı

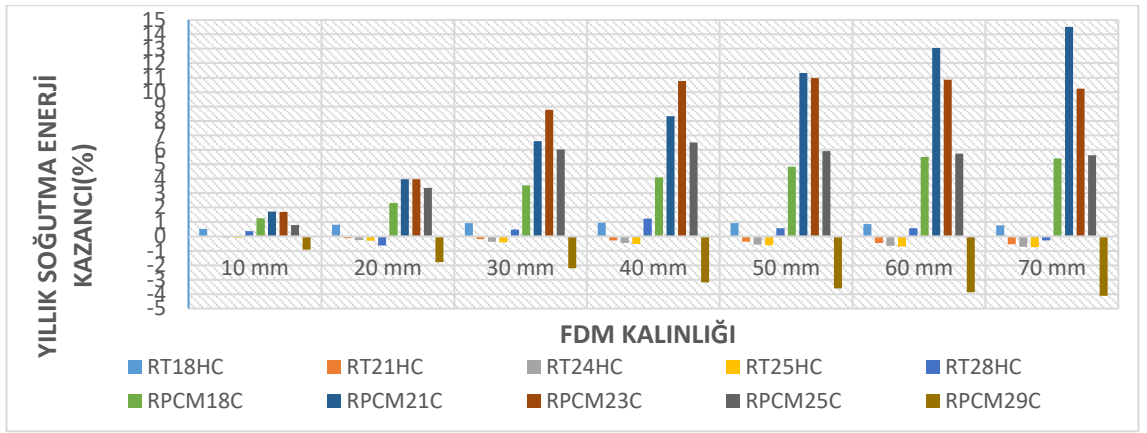


Şekil 41. Tip-2'deki teras çatılı bina modelinde FDM'siz ve FDM'li katmanların yıllık soğutma enerji ihtiyacı

Şekil 40'da gösterildiği gibi yıllık ısıtma enerji ihtiyacı, kalınlık artıkça tüm erime sıcaklıklarında enerji ihtiyacı azalmaktadır. Ayrıca Şekil 41'e bakılırsa yıllık soğutma enerji ihtiyacı RPCM18C, RPCM21C, RPCM23C ve RPCM25C malzemeler için verimli olduğu görülmektedir. RPCM21C(70 mm) malzemesi yıllık soğutma enerji ihtiyacını düşürmede en verimli olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 42. Tip-2’deki teras çatılı bina modelinde FDM’li katmanların yıllık ısıtma enerji kazançları



Şekil 43. Tip-2’deki teras çatılı bina modelinde FDM’li katmanların yıllık soğutma enerji kazançları

Sonuç olarak Tip-2 teras çatılı bina modelinde RTHC ile RPCM faz değiştiren malzemelerin yıllık ısıtma ve soğutma enerji kazançları olarak farklı etkiler bırakmıştır. RT18HC, RT21HC, RT24HC, RT25HC ve RT28HC kombinasyonları, yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacında daha verimli etki gösterirken, yıllık soğutma enerji ihtiyacı için aynı etkiyi gösterememiştir. RPCM18HC, RPCM21C, RPCM23C, RPCM25C yıllık soğutma enerji ihtiyacı için verimli durum oluştururken, yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı için aynı etki etmemiştir. Bu durum Şekil 42 ve Şekil 43’e bakılarak daha iyi anlaşılmaktadır.

5.1.4. RTHC ve RPCM Faz Değiştiren Malzemelerin Teras Çatılı Tip-3 Bina Modelinde Yıllık Isıtma ve Soğutma Enerji Performanslarının İncelenmesi

Bu bölümdeki çalışma teras çatılı Tip-3 bina modelinde RTHC malzemenin RT18HC, RT21HC, RT24HC, RT25HC ve RT28HC farklı erime sıcaklıkları ile RPCM malzemenin RPCM18C, RPCM21C, RPCM23C, RPCM25C ve RPCM29C farklı erime sıcaklıklarına bakılmıştır. Bakılan erime sıcaklıklarına göre kendi içlerinde 10 mm, 20

mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm ve 70 mm kalınlıklarında olmak üzere ısıtma ve soğutma enerji ihtiyaçlarının saatlik, aylık, yıllık performansları incelenmiştir. Her bir kalınlık ve her bir erime sıcaklığı için toplamda 70 farklı analiz yapılmıştır.

Tablo 18. RTHC ve RPCM entegreli tip-3 teras çatılı bina modelinde erime sıcaklığına göre yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyacı(kWh)

		RT18HC	RT21HC	RT24HC	RT25HC	RT28HC	
RubithermHC için	Isıtma	10 mm	52532.16	52979.41	52989.32	52990.88	52989.91
		20 mm	51038.92	51705.61	51721.27	51717.31	51717.78
		30 mm	49860.84	50647.72	50672.92	50676.72	50675.93
		40 mm	48885.32	49755.48	49777.28	49780.3	49783.03
		50 mm	48064.54	48990.66	49010.8	49005.31	49006.95
		60 mm	47338.38	48308.18	48340.19	48334.37	48331.58
		70 mm	46638.71	47706.84	47737.46	47734.51	47732.51
	Soğutma	10 mm	61057.25	61088.15	61017.67	60977.86	59824.77
		20 mm	61311.47	61364.75	61282.37	61225.74	59722.05
		30 mm	61548	61607.86	61538.9	61492.89	59532.48
		40 mm	61768.03	61835.14	61770.31	61723.98	57635.05
		50 mm	61959.39	62035.66	61991.9	61919.49	57802.98
		60 mm	62136.76	62223.31	62199.4	62124,02	58938.24
		70 mm	62290.1	62385.02	62358.81	62295.97	59176.18
		RPCM18C	RPCM21C	RPCM23C	RPCM25C	RPCM29C	
İnfiniteRPCM için	Isıtma	10 mm	53425.07	53989.08	54163.34	54210.06	54467.84
		20 mm	52684.52	53464.7	53766.48	53896.37	54168.44
		30 mm	52017.61	52943.64	53373.16	53606.62	53864.96
		40 mm	51445.75	52534.9	53000.13	53322.89	53571.94
		50 mm	50900.16	52182.17	52636.32	53345.2	53292.68
		60 mm	50399.78	51886.96	52297.74	53033.23	53023.7
		70 mm	49978.08	51564.52	51964.89	52702.24	52765.68
	Soğutma	10 mm	60656.29	59863.64	58833.73	57099.86	63440.67
		20 mm	60546.86	59493.07	57922.38	55954.83	64197.32
		30 mm	60517.76	59151.25	57369.13	55859.94	64810.72
		40 mm	60443.73	58833.45	56845.32	55952.8	65168.61
		50 mm	60405.09	58609.69	56421.62	56343.69	65443.6
		60 mm	60293.13	58517.53	55761.33	56427.23	65555.61
		70 mm	60074.15	58167.63	55409.34	56488.59	65617.44

Tablo 19. RTHC ve RPCM entegreli tip-3 teras çatılı bina modelinde erime sıcaklığına göre yıllık ısıtma ve soğutma enerji kazançları(%)

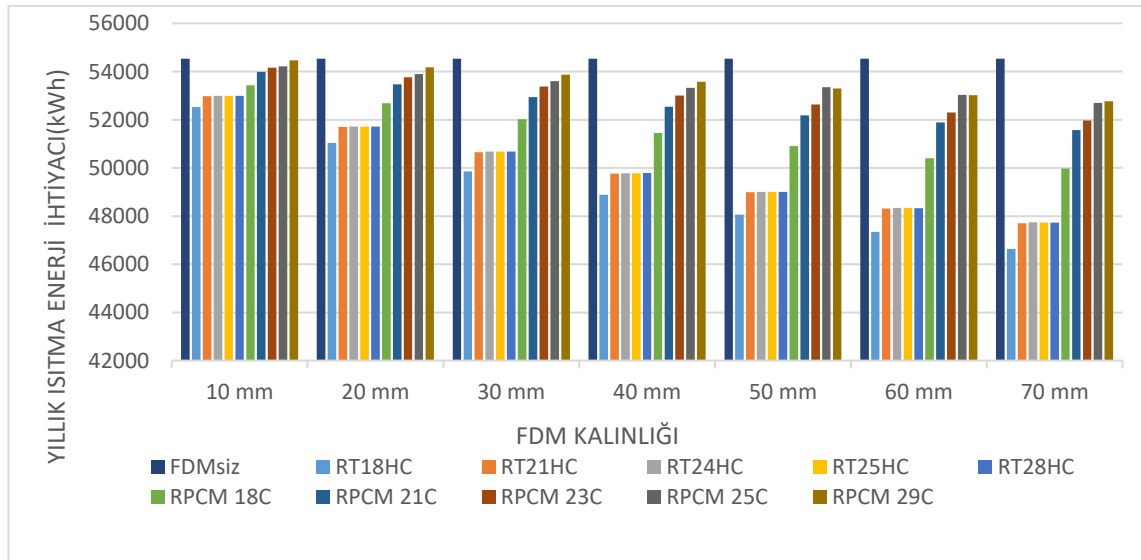
		RT18HC	RT21HC	RT24HC	RT25HC	RT28HC	
RubithermHC için	Isıtma	10 mm	3.659	2.839	2.820	2.818	2.819
		20 mm	6.397	5.175	5.146	5.153	5.152
		30 mm	8.558	7.115	7.069	7.062	7.063
		40 mm	10.347	8.751	8.711	8.706	8.701
		50 mm	11.852	10.154	10.117	10.127	10.124
		60 mm	13.184	11.405	11.347	11.357	11.362
		70 mm	14.467	12.508	12.452	12.457	12.461
	Soğutma	10 mm	-0.410	-0.461	-0.345	-0.279	1.617
		20 mm	-0.828	-0.916	-0.780	-0.687	1.786
		30 mm	-1.217	-1.315	-1.202	-1.126	2.098
		40 mm	-1.579	-1.689	-1.583	-1.506	5.218
		50 mm	-1.894	-2.019	-1.947	-1.828	4.942
		60 mm	-2.185	-2.328	-2.288	-2.164	3.075
		70 mm	-2.437	-2.594	-2.550	-2.447	2.683
		RPCM18C	RPCM 21C	RPCM 23C	RPCM 25C	RPCM 29C	
İnfiniteRPCM için	Isıtma	10 mm	2.021	0.987	0.667	0.582	0.109
		20 mm	3.379	1.949	1.395	1.157	0.658
		30 mm	4.602	2.904	2.116	1.688	1.214
		40 mm	5.651	3.654	2.801	2.209	1.752
		50 mm	6.652	4.301	3.468	2.168	2.264
		60 mm	7.569	4.842	4.089	2.740	2.757
		70 mm	8.343	5.433	4.699	3.347	3.231
	Soğutma	10 mm	0.249	1.553	3.247	6.098	-4.330
		20 mm	0.429	2.162	4.745	7.981	-5.574
		30 mm	0.477	2.724	5.655	8.137	-6.583
		40 mm	0.599	3.247	6.517	7.984	-7.171
		50 mm	0.662	3.615	7.213	7.342	-7.623
		60 mm	0.847	3.767	8.299	7.204	-7.808
		70 mm	1.207	4.342	8.878	7.103	-7.909

Tablo 18 ve Tablo 19 incelendiğinde Tip-3 teras çatılı bina modelinde yıllık ısıtma enerji ihtiyacı için RT18HC(70 mm) kombinasyonu yıllık 46638.71 kWh enerji ihtiyacı % 14.467 oranla ısıtma enerji performansının kazançlı çıktığı görülmüştür. Yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı için RTHC malzemenin RT18HC, RT21HC, RT24HC, RT25HC ve RT28HC kombinasyonları, aynı erime sıcaklığındaki farklı kalınlığa göre lineer bir şekilde enerji ihtiyacı düşmüştür. Enerji kazanç yüzdesi olarak arttığı tespit edilmiştir. Yıllık soğutma enerji ihtiyaçları incelendiğinde RT28HC(40 mm) kombinasyonu yıllık 57635.05 kWh soğutma enerji ihtiyacı % 5.218 oranla en verimli durumuna gelmiştir.

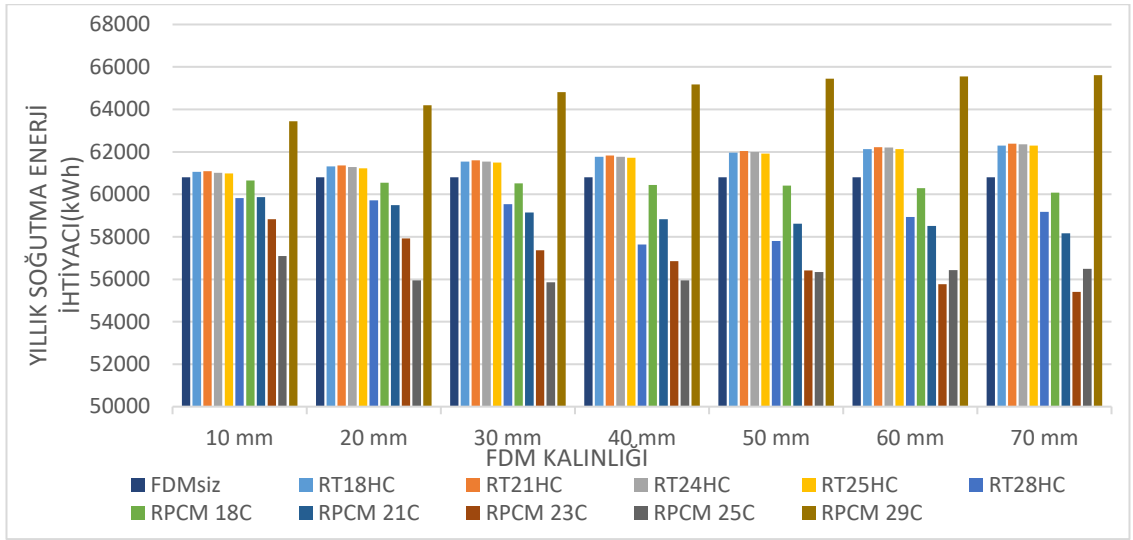
Kalınlık arttıkça verimlilik oranı düşmekte olduğu görülmektedir. Tip-3 teras çatılı bina modelin RPCM18HC, RPCM21C, RPCM23C, RPCM25C ve RPCM29C kombinasyonları içerisindeki RPCM18C(70 mm) kombinasyonda yıllık 49978.08 kWh ısıtma enerji ihtiyacı % 8.343 oranla en yüksek ısıtma enerji performansına çıkmıştır. Buradan yola çıkarak 70 mm kalınlığındaki RT18HC ve RPCM18HC malzemelerin yıllık ısıtma enerji performansları diğer erime sıcaklığındaki faz değiştiren malzemelere göre daha verimli olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 18 ve Tablo 19 incelendiğinde Tip-3 teras çatılı bina modelinde yıllık soğutma enerji ihtiyacı için RPCM23C(70 mm) kombinasyonda yıllık 55409.34 kWh enerji ihtiyacı % 8.878 oranla enerji performansı kazançlı çıktığı tespit edilmiştir. Yıllık soğutma enerji ihtiyacı için RPCM malzemenin RPCM18HC, RPCM21C ve RPCM23C kombinasyonları aynı erime sıcaklığındaki farklı kalınlığa göre lineer bir şekilde enerji ihtiyacı düştüğü, soğutma enerji kazanç yüzdesi olarak artmıştır. RPCM25C kombinasyonunda kalınlığa göre lineerlik sağlamamıştır.

Şekil 44’de gösterildiği gibi yıllık ısıtma enerji ihtiyacı kalınlık arttıkça tüm erime sıcaklıklarında enerji ihtiyacı düşmektedir. Ayrıca Şekil 45’e bakılırsa yıllık soğutma enerji ihtiyacı RPCM18C, RPCM21C, RPCM23C ve RPCM25C malzemeler için verimli olduğu görülmektedir. Ayrıca RPCM29C malzemenin kalınlık arttıkça yıllık soğutma enerji ihtiyacına olumsuz etki yapmıştır.

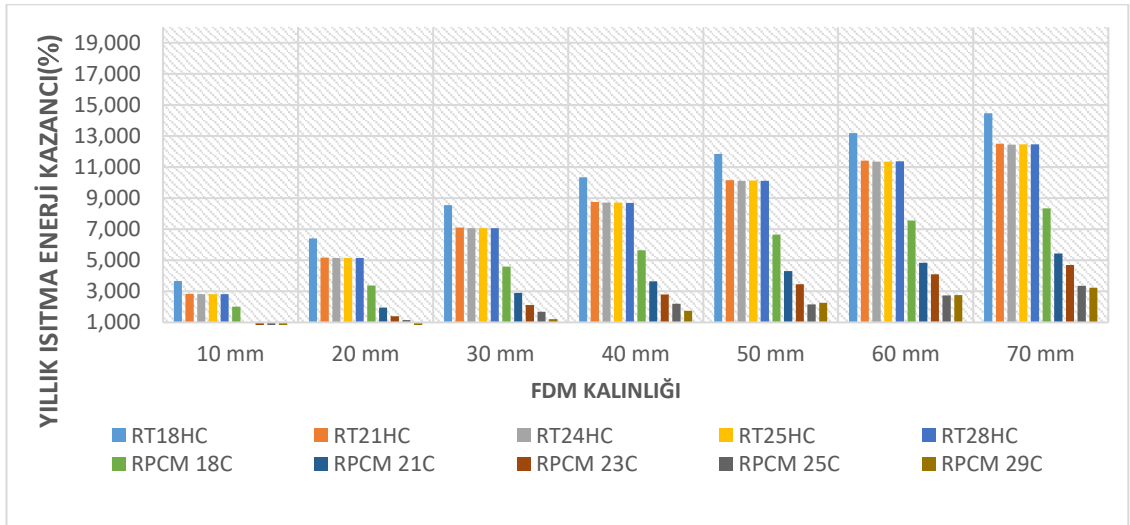


Şekil 44. Tip-3’deki teras çatılı bina modelinde FDM’siz ve FDM’li katmanların yıllık ısıtma enerji ihtiyacı

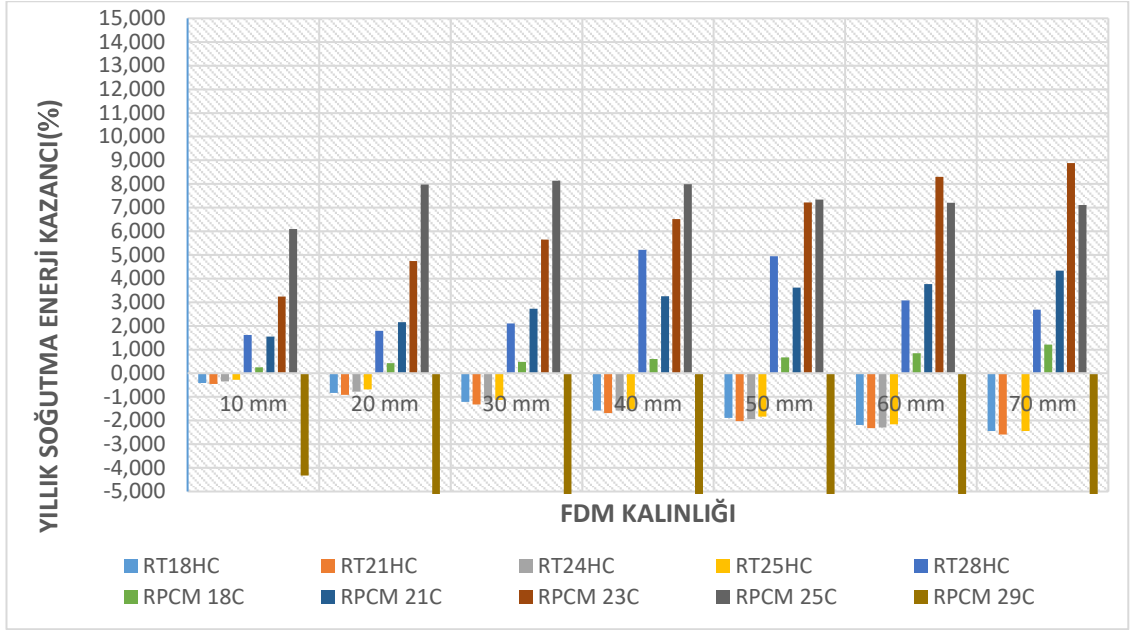


Şekil 45. Tip-3'deki teras çatılı bina modelinde FDM'siz ve FDM'li katmanların yıllık soğutma enerji ihtiyacı

Tüm bu bölümde sonuçları değerlendirildiğinde Tip-3 teras çatılı bina modelinde RTHC ile RPCM malzemelerin yıllık ısıtma ve soğutma enerji kazançları olarak farklı etkiler bırakmıştır. RT18HC, RT21HC, RT24HC, RT25HC ve RT28HC kombinasyonları, yıllık ısıtma enerji ihtiyacında daha verimli etki gösterirken yıllık soğutma enerji ihtiyacı için aynı etkiyi gösterememiştir. Fakat 40mm kalınlıktaki RT28HC malzemenin % 5.218 oranla yıllık soğutma enerji kazancında en verimli durumunu yakalamıştır. Aynı malzemenin 50 mm, 60 mm ve 70 mm kalınlıkta enerji kazancı düşmüştür. RPCM18HC, RPCM21C, RPCM23C, RPCM25C yıllık soğutma enerji ihtiyacı için verimli durum oluştururken, yıllık ısıtma enerji ihtiyacı için aynı etkiyi göstermemiştir. Bu durum Şekil 46 ve Şekil 47'e bakılarak daha iyi anlaşılmaktadır.



Şekil 46. Tip-3'deki teras çatılı bina modelinde FDM'li katmanların yıllık ısıtma enerji kazançları



Şekil 47. Tip-3’deki teras çatılı bina modelinde FDM’li katmanların yıllık soğutma enerji kazançları

5.1.5. RTHC ve RPCM Faz Değiştiren Malzemelerin Teras Çatılı Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 Bina Modellerinde Aylık Isıtma ve Soğutma Enerji Performanslarının İncelenmesi

Bu bölümde yıllık olarak incelenen teras çatı modelindeki Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 tiplerdeki senaryoları, aylık enerji ihtiyaçları (kWh) olarak incelenmiştir. Ayrıca FDM’li tiplerin FDM’siz çatı tiplerine göre aylık ve sezonluk enerji tasarruf oranları % olarak Çalışmada FDM’lerin entegre olduğu katmanlardaki teras çatılarda gün içerisinde asgari bir defa mahsus sarj ve desarj proseslerini tamamlanması beklenmektedir. Bu sebeble yapılan aylık analizleri detaylandırabilmek için ısıtma sezonunda Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 modelleri içerisindeki RT18HC(70 mm) kombinasyonu belirlenmiştir. Soğutma sezonunda ise Tip-1 modelindeki RPCM23C(40 mm) kombinasyonu, Tip-2 modelindeki RPCM21C(70 mm) kombinasyonu ve Tip-3 modelindeki RPCM23C(70 mm) kombinasyonu belirlenmiştir. Belirlenen tipler için yıl içerisindeki aylık ve saatlik analiz raporları oluşturulmuştur. Analizler sonucunda alınan veriler ile hazırlanan RTHC ve RPCM’in aylara göre ısıtma-soğutma enerji ihtiyaçları ve aylık enerji kazançları Tablo 20’de gösterilmiştir.

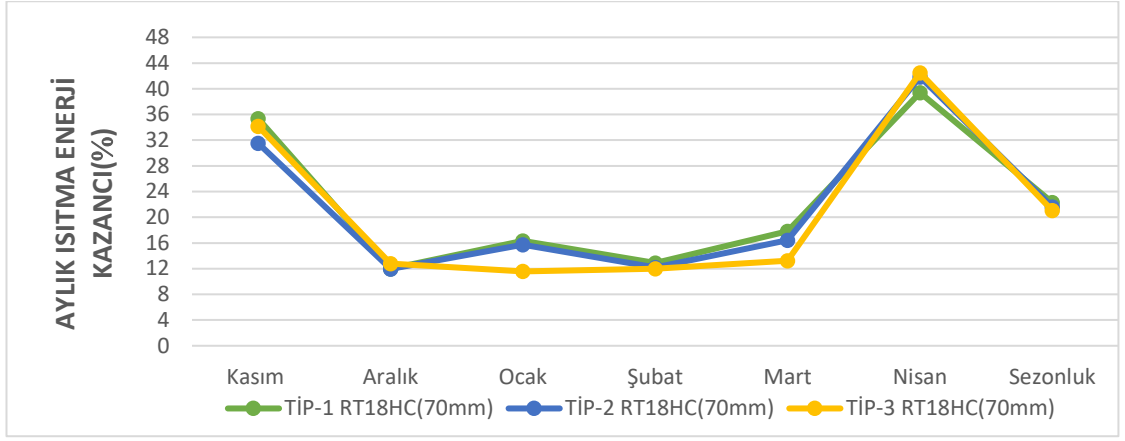
Tablo 20. RTHC ve RPCM en verimli erime sıcaklıklarındaki tip-1, tip-2 ve tip-3 teras çatılı bina modelinde aylık ısıtma ve soğutma sezonluk verimleri

Isıtma Sezonu				Soğutma Sezonu		
	FDM'siz (kWh)	RT18HC (70mm) (kWh)	Verim Oranı (%)	FDM'siz (kWh)	RPCM23C (40mm) (kWh)	Verim Oranı (%)
TİP-1	Ocak	13899.8	11632.44	16,31	0	0
	Şubat	14737.4	12838.75	12.88	0	0
	Mart	9143.01	7514.607	17.81	0	0
	Nisan	916.256	555.3667	39.39	171.70	221.04
	Mayıs	12.1092	0.044106	99.64	4173.21	3592.39
	Haziran	0	0	0	12170.3	10032.80
	Temmuz	0	0	0	18853.5	16071.63
	Ağustos	0	0	0	18949.3	16232.23
	Eylül	0	0	0	9204.38	8141.01
	Ekim	4.13241	0	100	751.13	842.25
	Kasım	3583.84	2316.658	35.36	18.06	35.41
	Aralık	10630.4	9355.593	11.99	0	0
	Yıllık	52926.8	44213.46	-	64291.6	55168.76
	Sezon	-	-	22.29	-	-
	Tasarruf Oranı					10.00
	FDM'siz (kWh)	RT18HC (70mm) (kWh)	Verim Oranı (%)	FDM'siz (kWh)	RPCM21C (70mm) (kWh)	Verim Oranı (%)
TİP-2	Ocak	13899.75	11710.85	15.75	0	0
	Şubat	14737.36	12941.63	12.18	0	0
	Mart	9143.014	7642.58	16.41	0	0
	Nisan	916.2561	532.77	41.85	171.70	188.13
	Mayıs	12,10923	0	100	4173.21	3509.59
	Haziran	0	0	0	12170.3	9996.8
	Temmuz	0	0	0	18853.5	16085.19
	Ağustos	0	0	0	18949.3	16259.34
	Eylül	0	0	0	9204.38	8099.99
	Ekim	4.13241	0	100	751.13	789.34
	Kasım	3583.838	2453.82	31,53	18.06	29.78
	Aralık	10630.38	9359.25	11.96	0	0
	Yıllık	52926.84	44640.92	-	64291.6	54958.16
	Sezon	-	-	21.61	-	-
	Tasarruf Oranı					11.59

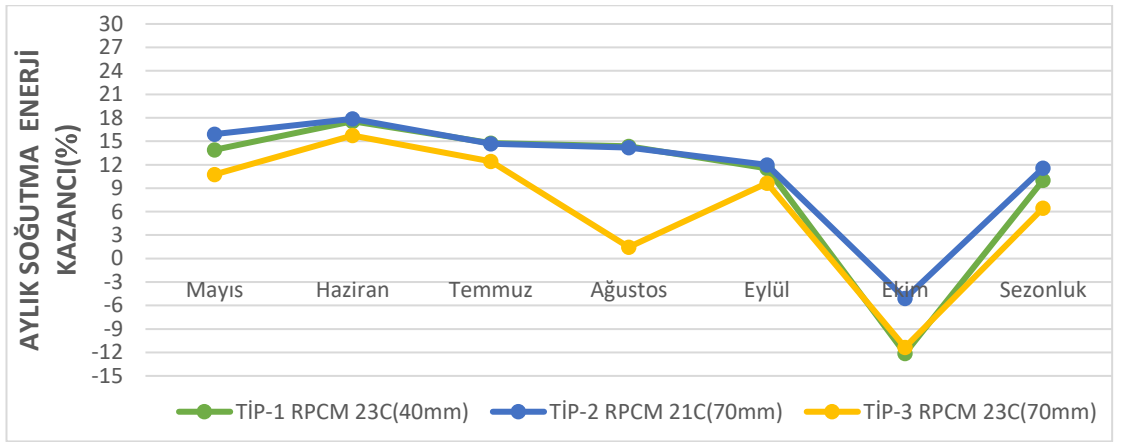
Tablo 20.(Devamı)

		Isıtma Sezonu			Soğutma Sezonu		
		FDM'siz (kWh)	RT18HC (70mm) (kWh)	Verim Oranı (%)	FDM'siz (kWh)	RPCM23C (70mm) (kWh)	Verim Oranı (%)
TIP-3	Ocak	14207.99	12564.54	11.57	0	0	0
	Şubat	15052.76	13245.24	12.01	0	0	0
	Mart	9526.999	8264.35	13.25	0	0	0
	Nisan	1082.936	622.99	42.47	126.316	159.7054	-26.43
	Mayıs	26.95463	1.36	94.94	3665.55	3271.77	10.74
	Haziran	0	0	0	11271.4	9498.592	15.73
	Temmuz	0	0	0	18092.8	15843.27	12.43
	Ağustos	0	0	0	18292.7	18026.27	1.46
	Eylül	0	0	0	8675.57	7836.468	9.67
	Ekim	10.14133	0.24	97.65	667.565	743.2921	-11.34
	Kasım	3771.757	2482.41	34.18	16.0536	29.97119	-86.69
	Aralık	10847.65	9457.56	12.81	0	0	0
	Yıllık	54527.19	46638.71	-	60807,9	55409.34	-
	Sezon Tasarruf Oranı	-	-	21.05	-	-	6.45

Isıtma sezonuna bakıldığında teras çatılı bina modelindeki çatı tiplerin performansları aylara göre değişkenlik gösterdiği görülmektedir. RT18HC'nin performansı incelendiğinde ısıtma sezonunu oluşturan Kasım, Aralık, Ocak, Şubat, Mart ve Nisan ayları için ısıtma sezonu tasarruf oranı % 22.29 olarak Tip-1 modelin diğer Tip-2 ve Tip-3 göre daha kazançlı olduğu anlaşılmaktadır. Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 modellerinde ısıtma sezonundaki aylara bakıldığında 3 tipte de ısıtma sezonu için en kazançlı ayın Nisan olduğu görülmüştür. Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 tiplerin Nisan aylarına bakıldığında % 42.47 oranla diğer tiplere göre Tip-3'ün en yüksek orana sahip olduğu Şekil 48'de görülmektedir. RPCM21C'nin performansına soğutma sezonu oluşturan Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos, Eylül ve Ekim aylardan soğutma sezonu tasarruf oranı olarak bakılmıştır. Sezonluk tasarruf oranı %11.59 olarak Tip-2 modelinde diğer Tip-1 ve Tip-3 göre daha kazançlı olduğu tespit edilmiştir. Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 bina modelinde soğutma sezonundaki aylara bakıldığında 3 farklı tipte de soğutma sezonu için en kazançlı ayın Haziran olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 tipler içinde en verimli ayın Haziran olduğu bulunmuştur. Soğutma sezonu Haziran ayının en yüksek kazancı % 17.86 oranla Tip-2 bina modelinde olduğu Şekil 49'da görülmektedir.

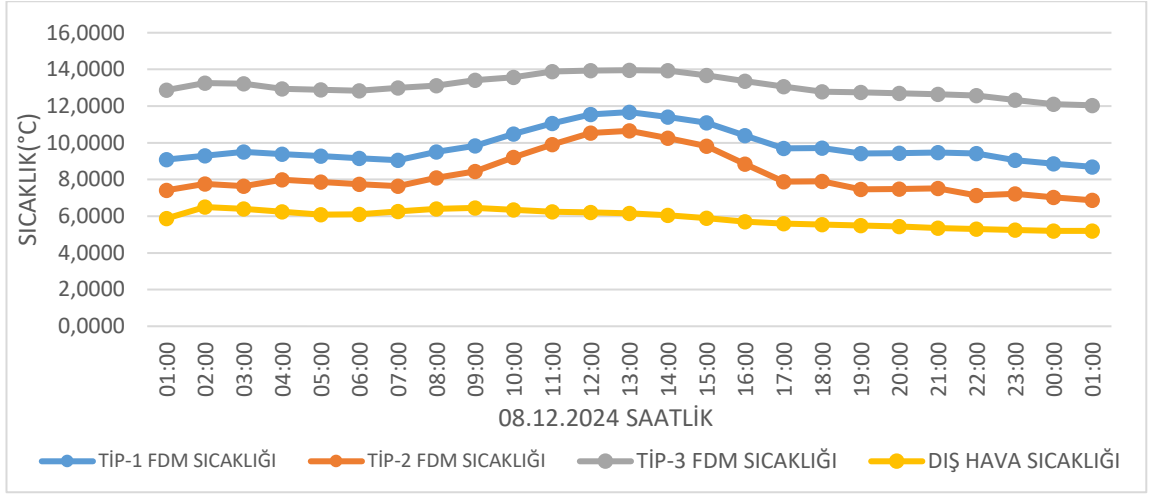


Şekil 48. Teras çatılı bina modelindeki belirlenen tiplere göre ısıtma sezonu için aylık ısıtma enerji kazançları



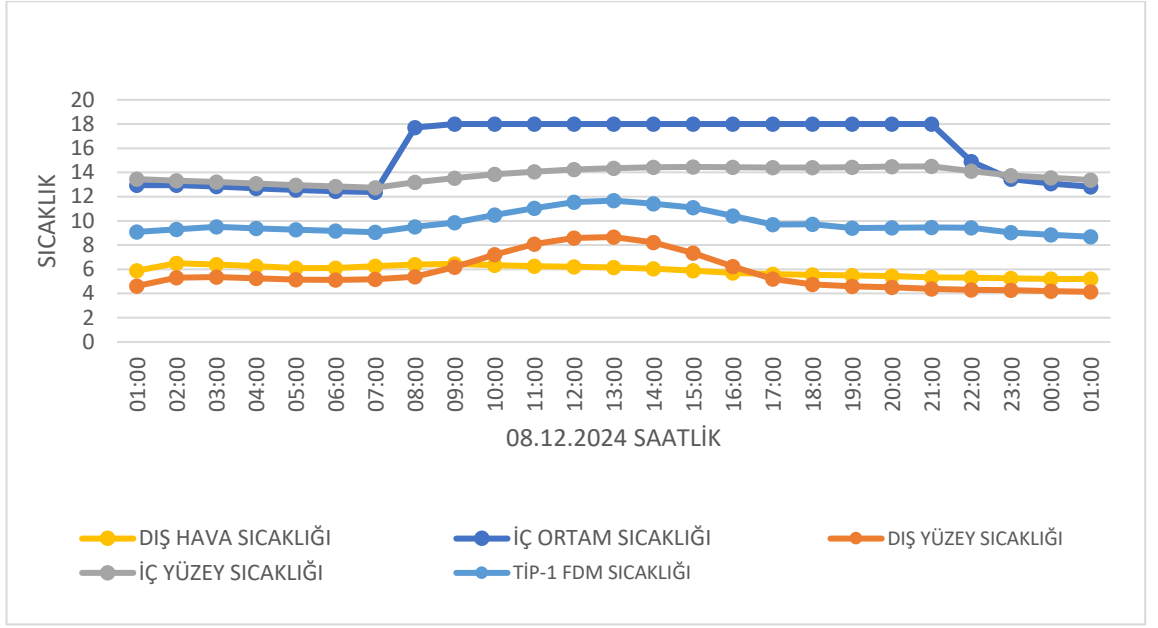
Şekil 49. Teras çatılı bina modelindeki belirlenen tiplere göre soğutma sezonu için aylık soğutma enerji kazançları

Bu bölümde ısıtma sezonu için 08.12.2024 tarihli İstanbul ili için Csa iklim sınıfıyla değerlendirdiğinde dış hava sıcaklığı ve RT18HC(70 mm) kombinasyonundaki Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 teras çatılı bina modellerin FDM sıcaklıkları Şekil 50’de görülmektedir. Tip-3 RT18HC kombinasyonun FDM sıcaklığı diğer Tip-1 ve Tip-2’deki RT18HC malzemeye kıyasla daha yüksek seviyeye çıkmıştır. Tüm tiplerdeki FDM sıcaklığı gün içerisinde 10:00 ile 15:00 saatleri arasında sıcaklık değişimleri dalgalı bir şekilde ilerlediği saat 12:00 zaman diliminde en yüksek varmıştır. Saat 15:00 zaman diliminden sonra FDM sıcaklıklarında azalış eğilimine dönmüştür. Tip-1 ve Tip-2’deki FDM malzeme sıcaklıklarında gün ortasındaki sıcaklık dalgalanmalarının daha keskin olduğu ve tüm bunların FDM malzemelerin 08.12.2024 tarihli İstanbul ili için kış iklimindeki güneşlenme veya gün ışığı saatinin yılın en düşük seyrettiği zaman çizelgesinde olduğu Şekil 50’de tespit edilmiştir. 08.12.2024 tarihli İstanbul ili için yaklaşık dış hava sıcaklığının 5°C -7°C olduğu zaman diliminde FDM sıcaklığı en yüksek olarak belirlenen Tip-3’de yaklaşık 14°C sıcaklıklarına çıkmıştır.



Şekil 50. 08.12.2024 tarihli tip-1, tip-2 ve tip-3 bina modelinde RT18HC(70 mm) saatlik sıcaklık değişimi

Yapılan bu bölümdeki çalışma ısıtma sezonundaki Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 içerisindeki en verimli olarak tespit edilen Tip-1 teras çatılı bina modelindeki RT18HC(70 mm) kombinasyonunda, 08.12.2024 tarihli İstanbul iklim şartlarına göre FDM sıcaklığına, iç yüzey sıcaklığına, dış yüzey sıcaklığına ve iç ortam sıcaklığına Şekil 51’de bakılmıştır. Isıtma sezonu için iç ortam sıcaklığı Tip-1 FDM sıcaklığı, dış yüzey sıcaklığı ve kısmen de olsa iç yüzey sıcaklıklarına göre daha yüksek seyrettiği Şekil 51’de görülmektedir. İç ortam sıcaklığı gün içerisinde saat 07:00’den sonra ani bir yükselişle yaklaşık 12 °C sıcaklığından yaklaşık 18 °C sıcaklığına çıktığı saat 20:00 kadar lineer bir şekilde 18 °C sıcaklıklarında kaldığı, daha önce belirtilen gibi dış hava sıcaklığı gün içerisinde 5°C -7°C arasında seyrettiği Şekil 51’de tespit edilmiştir. İç yüzey sıcaklığı, iç ortam sıcaklığına göre daha az değişken gösterdiği, dış yüzey sıcaklığı saat 01:00-09:00 ve 16:00-01:00 aralıklarında dış ortam sıcaklığına göre daha düşük eğilimde olduğu, güneşlenmenin veya gün ışığının etkili olduğu vakit dilimlerinde saat 09:00-16:00 aralığında dış ortam sıcaklığının üzerine çıktığı Şekil 51’de tespit edilmiştir. Dış ortam sıcaklığının 5°C -7°C arasında seyrettiği zaman diliminde iç ortam sıcaklığı 12°C-18°C arasında sıcaklık dağılımı göstermektedir.

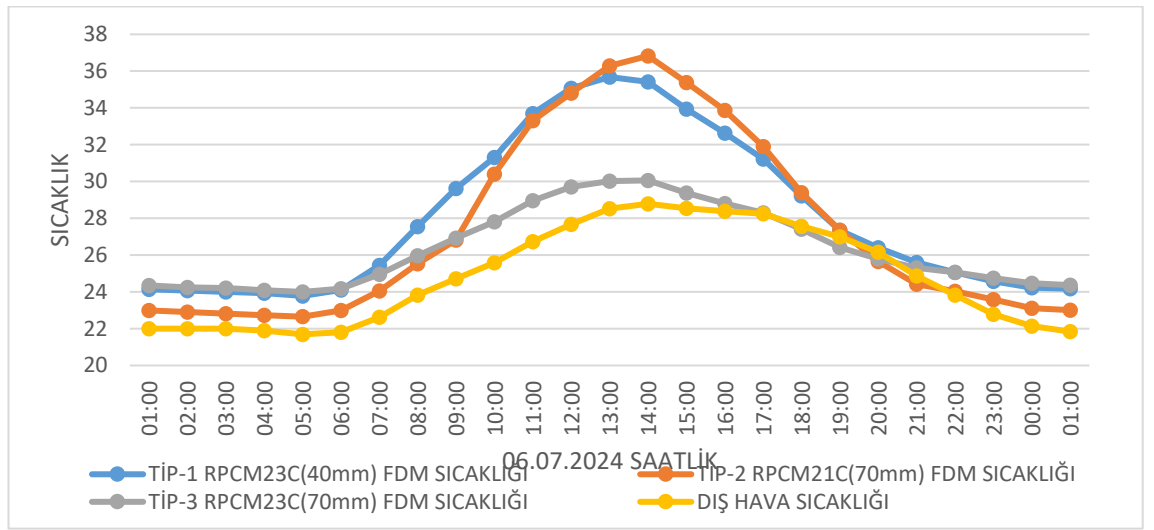


Şekil 51. 08.12.2024 tarihli tip-1 teras çatılı bina modelindeki RT18HC(70 mm) saatlik sıcaklık değişimi

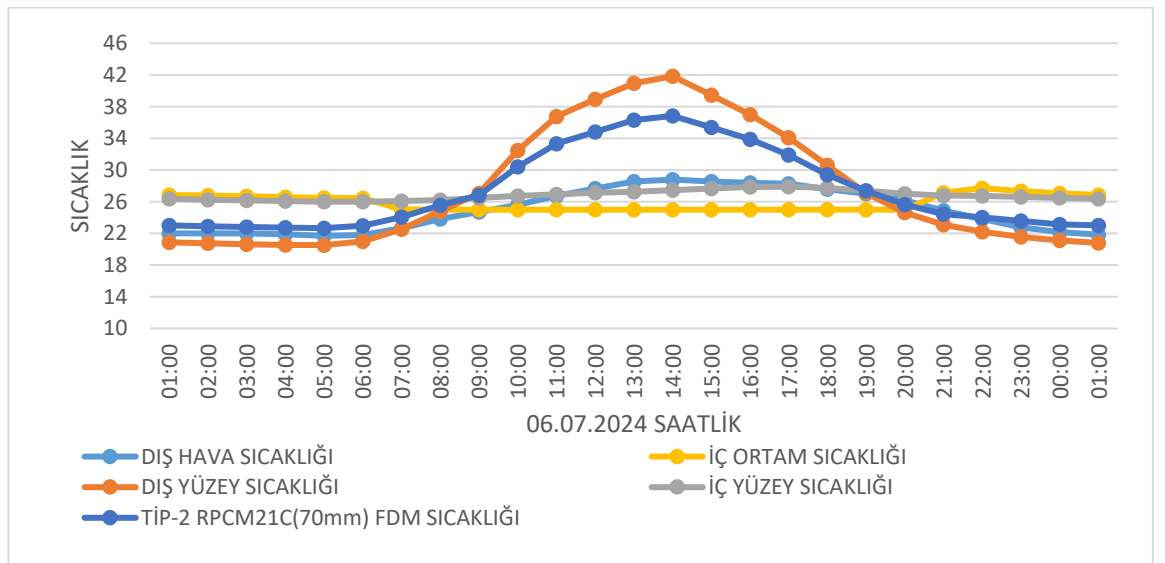
Soğutma sezonu irdelendiğinde 06.07.2024 tarihli İstanbul ili için iklim şartlarına göre değerlendirildiğinde dış hava sıcaklığı, teras çatılı bina modelindeki Tip-1 RPCM23C(40mm), Tip-2 RPCM21C(70 mm) ve Tip-3 RPCM23C(70 mm) FDM sıcaklıkları yüksek çıktığı Şekil 52’de görülmektedir. Tip-2 RPCM21C(70 mm) kombinasyonundaki FDM sıcaklığı diğer Tip-1 RPCM23C(40 mm) ve Tip-3 RPCM23C(70 mm) malzemeye kıyasla daha yüksek seviyeye çıkmıştır. Tüm tiplerdeki FDM sıcaklığı gün içerisinde 07:00 ile 20:00 saatleri arasında sıcaklık değişimleri dalgalı bir şekilde ilerlediği saat 14:00 zaman diliminde pik noktaya çıkmıştır. Saat 15:00 sularından sonra FDM sıcaklıklarında azalış eğilimine dönmüştür. Tip-1 ve Tip-2’deki FDM malzeme sıcaklıklarında gün ortasındaki sıcaklık dalgalanmalarının daha keskin olmuştur. Tüm bunların FDM malzemelerin 06.07.2024 tarihli İstanbul ili için yaz iklimdeki güneşlenme veya gün ışığı saatinin yılın en yüksek seyrettiği zaman çizelgesinde Şekil 52’de tespit edilmiştir. 06.07.2024 tarihli İstanbul ili için yaklaşık dış hava sıcaklığının 14°C -20°C olduğu FDM sıcaklığı en yüksek olarak belirlenen Tip-2 RPCM21C(70 mm) kombinasyonunda yaklaşık 37°C sıcaklıklarına kadar çıkmıştır.

Bu bölümde Tablo 19’da görüldüğü üzere soğutma sezonundaki Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 içerisindeki en verimli olarak tespit edilen Tip-2 teras çatılı bina modelindeki RPCM21C(70 mm) kombinasyonunda 06.07.2024 tarihli İstanbul iklim şartlarına göre FDM sıcaklığı, iç yüzey sıcaklığı, dış yüzey sıcaklığı ve iç ortam sıcaklığı incelenmiştir. Soğutma sezonu için iç ortam sıcaklığı, Tip-2 FDM sıcaklığı ve dış ortam sıcaklığına göre daha konfor sıcaklık aralığında seyrettiği Şekil 53’ de görülmektedir. İç ortam sıcaklığı

gün içerisinde saat 01:00'den sonra diğer gece saat 01:00 kadar, yaklaşık 24°C-27°C sıcaklık aralığında lineer eğilim gösterdiği anlaşılmaktadır. İç yüzey sıcaklığı ve iç ortam sıcaklığı hemen hemen paralel bir eğilimle bir grafik oluşturmuştur. Dış yüzey sıcaklığı gün boyunca dış ortam sıcaklığına göre daha yüksek eğilimde olduğu, güneşlenmenin veya gün ışığının etkili olduğu anlaşılmaktadır. Saat 07:00-20:00 aralığındaki dış ortam sıcaklığın daha keskin fark oluşturmuştur. Yaklaşık 42°C ile dış yüzey sıcaklığı saat 14:00 zaman diliminde pik noktaya çıktığını Şekil 53'de görülmektedir. Dış ortam sıcaklığının 14°C -20°C arasında kalırken aynı zaman diliminde iç ortam sıcaklığı 24°C-27°C arasında sıcaklık aralığında kalmıştır.



Şekil 52. 06.07.2024 tarihli teras çatılı bina modelindeki tip-1, tip-2 ve tip-3 bina modelinde saatlik FDM sıcaklık değişimi



Şekil 53. 06.07.2024 tarihli tip-2 teras çatılı bina modelindeki RPCM21HC(70 mm) saatlik sıcaklık değişimi

5.2. Kullanılmayan Çatı Aralı Binada Entegre Edilen Faz Değiştiren Malzemelerin Termal Performanslarının İrdelenmesi

Bu bölümde kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki çatı katmanına FDM eklenmiştir. Kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki çatı katmanına eklenen FDM’li ile FDM’siz arasında oluşan termal performanslar irdelenmiştir. Kullanılan RTHC malzemenin erime sıcaklığına göre RT18HC, RT21HC, RT24HC, RT25HC, RT25HC ile RPCM malzemenin erime sıcaklığına göre RPCM18C, RPCM21C, RPCM23C, RPCM25C, RPCM29C malzemeleri olmak üzere 10 farklı inceleme yapılmıştır. Yapılan incelemede FDM kombinasyonların 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm ve 70 mm, kalınlıkları hesaba katarak her çatı tipi için toplamda 70 farklı analiz yapılmıştır. Belirlenen çatı tipi kullanılmayan çatı aralı modeli için yıllık ve saatlik analizler yapılmıştır. Geniş bir yelpazede yorum yapmaya olanak sağlayan toplamda 70 farklı analiz sonucu elde edilmiştir. Tüm farklı çatı tip modellerinin analiz sonuçlarından yıllık ısıtma soğutma performans sonuç verileri, saatlik ısıtma soğutma performans sonuç verileri ve aylık ısıtma soğutma performans sonuç verileri oluşturulmuştur. Sonuçlar DesignBuilder programı “Simulation” kısmında yıllık saatlik simülasyonu yapılarak “view EnergyPlus results” penceresinden alınmıştır. Daha sonra çatı katmanında FDM kullanılan binanın analiz sonuçları ile çatı katmanında FDM kullanılmayan binanın analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda simülasyonu yapılan binanın program analizlerinden elde edilen ortam sıcaklığı (°C), iç yüzey sıcaklığı (°C), dış yüzey sıcaklığı (°C), çatı sıcaklığı (°C) ve konfor sıcaklığı (°C) parametrelerinden faydalanılmıştır. FDM’siz ve FDM’li kullanılmayan çatı aralı bina modelleri için ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyacına etkisinin araştırılması amacıyla yıllık bazda analiz sonuçları değerlendirilmiştir.

5.2.1. FDM’siz ve FDM’li Çatı Katmanların Detayları;

DesignBuilder yazılımında yapılan modellemenin, 2024 yılına ait İstanbul iklim verilerine göre Şekil 54, Şekil 55 ve Şekil 56’da gösterilen çatı katmanlarıyla 3 farklı kullanılmayan çatı aralı bina modeli belirlenmiştir. Belirlenen çatı katmanlarına arasına öncelikle 1 cm kalınlığındaki RT25HC ve RPCM25 erime sıcaklığına sahip malzemeler eklenerek FDM’siz çatılı binaya göre Tablo 21’ de gösterilen verimli çatı tipi modelleri belirlenmiştir.



Şekil 54. Kullanılmayan çatı aralı bina modelinin FDM'siz çatı kesiti tip-1



Şekil 55. Kullanılmayan çatı aralı bina modelinin FDM'siz çatı kesiti tip-2



Şekil 56. Kullanılmayan çatı aralı bina modelinin FDM'siz çatı kesiti tip-3

Tablo 21. FDM'siz kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki çatı tiplerine göre yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyaçları

		Isıtma	Soğutma
Tip-1	kWh	49032.39	63119.93
Tip-2	kWh	49637.20	64117.66
Tip-3	kWh	49747.33	61357.95
Tip-1a	kWh	49032.39	63119.93
Tip-3a	kWh	49747.33	61357.95

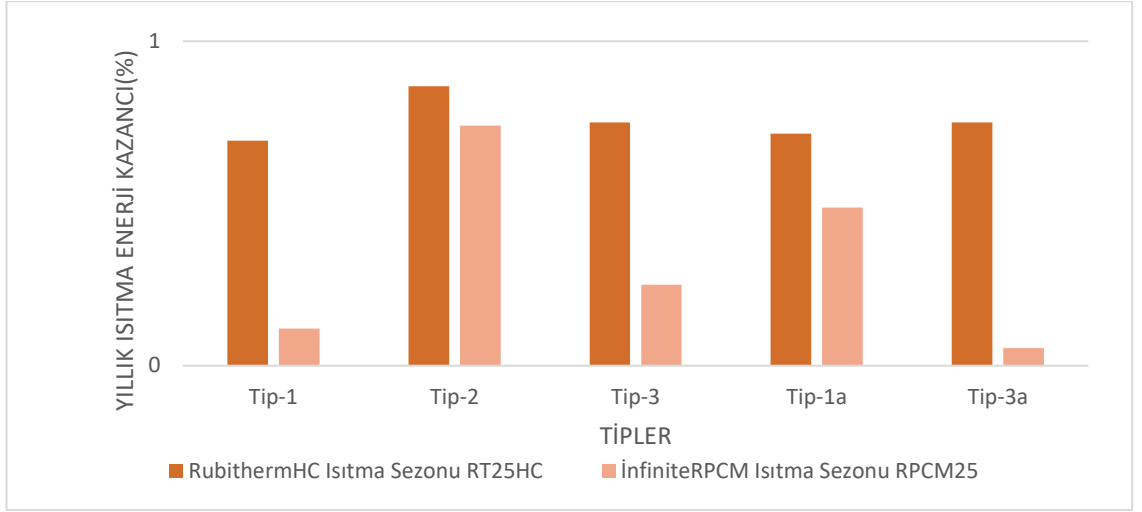
Tablo 22. FDM’li kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki çatı tiplerine göre 25 °C erime sıcaklığında yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyaçları

		Isıtma	Soğutma	Isıtma	Soğutma
		RT25HC	RT25HC	RPCM25	RPCM25
Tip-1	kWh	48692.23	63204.72	48976.37	62187.91
	%	0.6937	-0.134	0.114	1.477
Tip-2	kWh	49209.36	64153.99	49270.10	63351.95
	%	0.8619	-0.057	0.740	1.194
Tip-3	kWh	49374.08	61549.79	49623.43	61834.87
	%	0.7503	-0.313	0.249	-0.777
Tip-1a	kWh	48681.70	63229.43	48793.42	63303.45
	%	0.7152	-0.174	0.487	-0.291
Tip-3a	kWh	49374.36	61525.93	49720.18	61858.65
	%	0.750	-0.274	0.055	-0.816

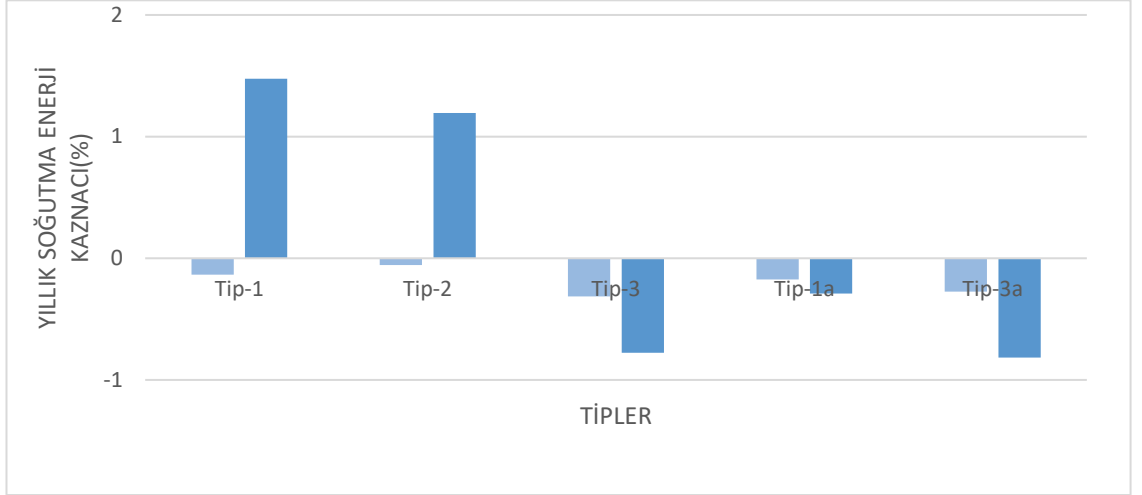
Bu bölümde ısıtma ve soğutma enerji ihtiyaçları için 25 °C erime sıcaklığındaki RubithermHC ve İnfiniteRPCM malzemelerin Tip-1, Tip-2, Tip-3, Tip-1a ve Tip-3a olarak 5 farklı FDM’li çatı tipi oluşturulmuştur. Daha önce oluşturduğumuz 3 tipi teras çatı tipinden farklı bir senaryo geliştirerek FDM’li katmanı Tablo 21 ve Tablo 22’de gösterildiği gibi Tip-1a ve Tip-3a kullanılmayan çatı aralı bina modeli oluşturulmuştur. Tablo 21’ e bakıldığında Tip-1 kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki binanın yıllık ısıtma enerji ihtiyacı 49032.39 kWh ile en düşük olduğu tespit edilmiştir. Tip-3’in FDM’siz kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki çatı katmanında binanın yıllık soğutma enerji ihtiyacı 61357.95 kWh ile en düşük olduğu görülmüştür

Tablo 22 irdelendiğinde, 1 cm RPCM25 kombinasyonunda yıllık ısıtma enerji ihtiyacı en yüksek performansı Tip-2’de göstermiştir. 1 cm RPCM25 kombinasyonunda yıllık soğutma enerji ihtiyacı olarak irdelendiğinde kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki çatı tipleri olan Tip-1, Tip-2, Tip-3, Tip-1a ve Tip-3a verimsiz performans göstermişlerdir.

1 cm RPCM25 kombinasyonunda yıllık ısıtma enerji ihtiyacı olarak incelenirse kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki % 0.7396 oranı 49270.10 kWh yıllık ısıtma enerji ihtiyacı ile en yüksek performansı Tip-2’de görülmüştür. 1 cm RPCM25 kombinasyonunda yıllık soğutma enerji ihtiyacı olarak irdelendiğinde kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki % 1.4766 oranı 62187.91 kWh yıllık soğutma enerji ihtiyacı ile en yüksek performansı Tip-1’de görülmüştür.

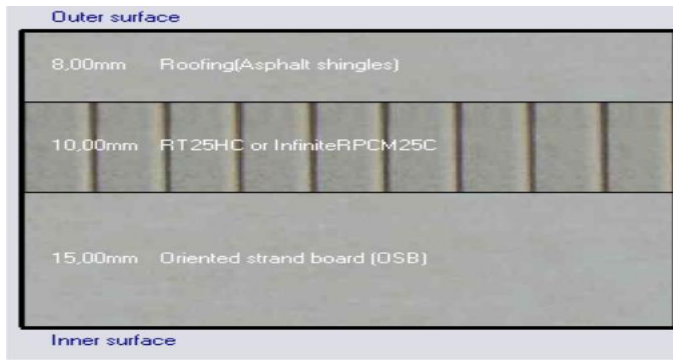


Şekil 57. RT25HC ve RPCM25C entegre kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki çatı tiplerine göre yıllık ısıtma enerji kazancı



Şekil 58. RT25HC ve RPCM25C entegre kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki çatı tiplerine göre yıllık soğutma enerji kazancı

Sonuç olarak bu bölümdeki çalışma kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki çatı tipi olarak en verimli olacak tek çatı tipine indirgenmiştir. Çalışmalar sonucunda Tablo 21, Tablo 22, Şekil 57 ve Şekil 58'e bakıldığında yıllık ısıtma enerji ihtiyacında RT25HC'nin RPCM25C göre daha verimli olduğu, yıllık soğutma enerji ihtiyacında RPCM25C'nin RT25HC göre daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Tablo 21, Tablo 22, Şekil 57 ve Şekil 58'de görüldüğü gibi Tip-2 yıllık ısıtma enerji ihtiyacı olarak RT25HC'nin ve yıllık soğutma enerji ihtiyacı olarak RPCM25C'nin Tip-1'de en verim olduğu görülmüştür. Yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyacı olarak her iki fonksiyonu ele alırsak RPCM25C faz değiştiren malzemenin Tip-2'deki verimi, diğer tiplere göre daha performanslı olduğu bulunmuştur. Tüm bu fonksiyonları ve grafikleri ele alırsak Tip-2 çatı tipinin daha iyi sonuçlar çıkaracağını öngörülmektedir. Kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki çatı tipi Şekil 59'da görüldüğü üzere Tip-2 olarak devam edilmiştir.



Şekil 59. Kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki FDM'li çatı kesiti tip-2

Simulasyon sonuçlarına göre seçilen en verimli FDM entegre çatı tipinde en üst katmanda hem su geçirmesini engelleyen hemde çatı kaplaması olan şingil kullanılmıştır. Faz değiştiren malzemede darbelere, rutubete dayanıklı yonga levha olarak tanımlanan OSB malzemesi arasına eklenmiştir.

Tablo 23. RTHC ve RPCM entegre tip-2 de kalınlık ve erime sıcaklığına göre ısı geçirgenlik katsayısı

			FDMsiz	RT18HC	RT21HC	RT24HC	RT25HC	RT28HC
Çatı Tip-2	10 mm	(W/m2.K)	2.793	2.451	2.451	2.451	2.451	2.451
	20 mm	(W/m2.K)	2.793	2.184	2.184	2.184	2.184	2.184
	30 mm	(W/m2.K)	2.793	1.969	1.969	1.969	1.969	1.969
	40 mm	(W/m2.K)	2.793	1.792	1.792	1.792	1.792	1.792
	50 mm	(W/m2.K)	2.793	1.645	1.645	1.645	1.645	1.645
	60 mm	(W/m2.K)	2.793	1.520	1.520	1.520	1.520	1.520
	70 mm	(W/m2.K)	2.793	1.413	1.413	1.413	1.413	1.413
			FDMsiz	RPCM18C	RPCM21C	RPCM23C	RPCM25C	RPCM29C
Çatı Tip-2	10 mm	(W/m2.K)	2.793	2.701	2.701	2.701	2.701	2.701
	20 mm	(W/m2.K)	2.793	2.614	2.614	2.614	2.614	2.614
	30 mm	(W/m2.K)	2.793	2.533	2.533	2.533	2.533	2.533
	40 mm	(W/m2.K)	2.793	2.457	2.457	2.457	2.457	2.457
	50 mm	(W/m2.K)	2.793	2.385	2.385	2.385	2.385	2.385
	60 mm	(W/m2.K)	2.793	2.317	2.317	2.317	2.317	2.317
	70 mm	(W/m2.K)	2.793	2.253	2.253	2.253	2.253	2.253

Tablo 23'e bakıldığında belirlenen kullanılmayan çatı aralı Tip-2 bina modelindeki malzemelerin ısı iletkenlik katsayısını(k), ısı geçirgenlik dirençleri(R) incelenmiştir. FDM'siz ve FDM'li Tip-2 bina modelinde ısı geçirgenlik katsayısına(U) bakılmıştır.

5.2.2. RTHC ve RPCM Faz Değiştiren Malzemelerin Kullanılmayan Çatı Aralı Tip-2 Bina Modelinde Yıllık Isıtma ve Soğutma Enerji Performanslarının İncelenmesi

Bu bölümdeki çalışma kullanılmayan çatı aralı Tip-2 bina modelinde RTHC malzemenin RT18HC, RT21HC, RT24HC, RT25HC ve RT28HC erime sıcaklıkları ile RPCM malzemenin RPCM18C, RPCM21C, RPCM23C, RPCM25C ve RPCM 29C erime sıcaklıklarına bakılmıştır. Bakılan erime sıcaklıklarına göre kendi içlerinde 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm ve 70 mm kalınlıklarında olmak üzere ısıtma ve soğutma enerji ihtiyaçlarının saatlik, aylık, yıllık performansları incelenmiştir. Her bir kalınlık ve her bir erime sıcaklığı için toplamda 70 farklı analiz yapılmıştır.

Tablo 24 ve Tablo 25'e bakıldığında Tip-2 kullanılmayan çatı aralı bina modelinde yıllık ısıtma enerji ihtiyacı için 70 mm RT18HC kombinasyonun 46218.68 kW/h enerji ihtiyacı % 6.8870 oranla enerji performansının kazançlı çıktığı görülmektedir. Yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı için RT18HC, RT21HC, RT24HC, RT25HC ve RT28HC kombinasyonları, aynı erime sıcaklığındaki farklı kalınlığa göre lineer bir şekilde ısıtma enerji ihtiyacı azaldığı, enerji kazanç yüzdesi olarak artmıştır. Soğutma enerji ihtiyacında ise RT18HC ve RT28HC kombinasyonların dışındaki RT21HC, RT24HC ve RT25HC malzemelerin verimsiz olduğu anlaşılmaktadır. Tip-2 kullanılmayan çatı aralı bina modelinde RPCM18HC, RPCM21C, RPCM23C, RPCM25C ve RPCM29C kombinasyonların içindeki 70 mm RPCM18C bina modelinde yıllık 46890.09 kWh ısıtma enerji ihtiyacı % 5.5344 oranla en yüksek enerji performansı bulunmuştur. Buradan yola çıkarak RT18HC ve RPCM18HC malzemelerin yıllık ısıtma enerji ihtiyacı olarak enerji performansları diğer erime sıcaklığındaki faz değiştiren malzemelere göre daha verimli olduğu görülmektedir.

Tablo 24 ve Tablo 25'e bakıldığında Tip-2 kullanılmayan çatı aralı bina modelinde yıllık ısıtma enerji ihtiyacı için 70 mm RT18HC kombinasyonun 46218.68 kW/h enerji ihtiyacı % 6.8870 oranla enerji performansının kazançlı çıktığı görülmektedir. Yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı için RT18HC, RT21HC, RT24HC, RT25HC ve RT28HC kombinasyonları, aynı erime sıcaklığındaki farklı kalınlığa göre lineer bir şekilde ısıtma enerji ihtiyacı azaldığı, enerji kazanç yüzdesi olarak artmıştır. Soğutma enerji ihtiyacında ise RT18HC ve RT28HC kombinasyonların dışındaki RT21HC, RT24HC ve RT25HC malzemelerin verimsiz olduğu anlaşılmaktadır. Tip-2 kullanılmayan çatı aralı bina modelinde RPCM18HC, RPCM21C, RPCM23C, RPCM25C ve RPCM29C kombinasyonların içindeki 70 mm RPCM18C bina modelinde yıllık 46890.09 kWh

ısıtma enerji ihtiyacı % 5.5344 oranla en yüksek enerji performansı bulunmuştur. Buradan yola çıkarak RT18HC ve RPCM18HC malzemelerin yıllık ısıtma enerji ihtiyacı olarak enerji performansları diğer erime sıcaklığındaki faz değiştiren malzemelere göre daha verimli olduğu görülmektedir.

Tablo 24. RTHC ve RPCM entegreli tip-2 kullanılmayan çatı aralı bina modelinde erime sıcaklığına göre yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyacı (kWh)

		RT18HC	RT21HC	RT24HC	RT25HC	RT28HC	
RubithermHC için	Isıtma	10 mm	48663.27	49216.35	49221.13	49209.36	49227.34
		20 mm	47943.97	48840.30	48845.64	48829.49	48834.80
		30 mm	47472,13	48508.16	48512.28	48494.87	48490.84
		40 mm	47080.96	48204.95	48210.17	48191.94	48177.57
		50 mm	46770.01	47930.20	47936.15	47917.50	47917.48
		60 mm	46522.38	47693.06	47690.26	47670.18	47660.39
		70 mm	46218.68	47468.45	47464.70	47449.97	47432.96
	Soğutma	10 mm	63491.33	64189.53	64231.14	64153.99	63827.89
		20 mm	63113.75	64184.88	64267.76	64156.91	63772.81
		30 mm	62990.65	64157.92	64251.19	64136.79	62867.33
		40 mm	62949.42	64140.92	64232.13	64114.18	63101.79
		50 mm	62958.10	64120.59	64211.99	64097.75	63119.57
		60 mm	62989.64	64103.32	64189.67	64077.19	63185.59
		70 mm	63025.66	64088.73	64167.87	64050.08	63198.48
		RPCM18C	RPCM 21C	RPCM 23C	RPCM 25C	RPCM 29C	
İnfiniteRPCM için	Isıtma	10 mm	48509.93	48916.16	49131.86	49270.103	49458.71
		20 mm	47909.80	48481.82	48866.52	49250.93	49450.38
		30 mm	47662.89	48234.38	48762.02	49326.25	49403.38
		40 mm	47408.20	48137.81	48996.71	49208.69	49331.14
		50 mm	47295.02	48463.4	48843.13	49079.49	49255.71
		60 mm	47066.25	48300.26	48729.48	48963.34	49178.11
		70 mm	46890.09	48067.73	48421.75	48845.21	49099.08
	Soğutma	10 mm	62641.87	61915.81	62270.88	63351.94	65412.52
		20 mm	61886.38	60225.70	60384.25	62342.78	66211.74
		30 mm	61330.16	59262.07	59971,36	62448.83	66600.24
		40 mm	61013.40	58065.47	60411.23	62501.82	66736.92
		50 mm	60819.98	58471.66	60435.13	62541.3	66712.88
		60 mm	60931.18	58478.19	60468.03	62584.91	66720.18
		70 mm	60757.81	58476.31	60488.36	62613.22	66847.25

Tablo 25. RTHC ve RPCM entegreli tip-2 kullanılmayan çatı aralı bina modelinde erime sıcaklığına göre yıllık ısıtma ve soğutma enerji kazançları (%)

		RT18HC	RT21HC	RT24HC	RT25HC	RT28HC	
RubithermHC için	Isıtma	10 mm	1.9621	0.8479	0.8382	0.8619	0.8257
		20 mm	3.4112	1.6055	1.5947	1.6272	1.6165
		30 mm	4.3618	2.2746	2.2663	2.3014	2.3095
		40 mm	5.1499	2.8854	2.8749	2.9116	2.9406
		50 mm	5.7763	3.4390	3.4270	3.4645	3.4646
		60 mm	6.2752	3.9167	3.9223	3.9628	3.9825
		70 mm	6.8870	4.3692	4.3768	4.4064	4.4407
	Soğutma	10 mm	0.9769	-0.1121	-0.1770	-0.0567	0.4519
		20 mm	1.5657	-0.1048	-0.2341	-0.0612	0.5378
		30 mm	1.7577	-0.0628	-0.2083	-0.0298	1.9501
		40 mm	1.8220	-0.0363	-0.1785	0.0054	1.5844
		50 mm	1.8085	-0.0046	-0.1471	0.0311	1.5567
		60 mm	1.7593	0.0224	-0.1123	0.0631	1.4537
		70 mm	1.7031	0.0451	-0.0783	0.1054	1.4336
		RPCM18C	RPCM 21C	RPCM 23C	RPCM 25C	RPCM 29C	
İnfiniteRPCM için	Isıtma	10 mm	2.2710	1.4526	1.0181	0.7396	0.3596
		20 mm	3.4801	2.3276	1.5526	0.7782	0.3764
		30 mm	3.9775	2.8261	1.7632	0.6264	0.4711
		40 mm	4.4906	3.0207	1.2903	0.8633	0.6166
		50 mm	4.7186	2.3647	1.5997	1.1236	0.7686
		60 mm	5.1795	2.6934	1.8287	1.3576	0.9249
		70 mm	5.5344	3.1619	2.4487	1.5956	1.0841
	Soğutma	10 mm	2.3017	3.4341	2.8803	1.1942	-2.0195
		20 mm	3.4800	6.0700	5.8228	2.7682	-3.2660
		30 mm	4.3475	7.5729	6.4667	2.6028	-3.8719
		40 mm	4.8415	9.4392	5.7807	2.5201	-4.0851
		50 mm	5.1432	8.8057	5.7434	2.4585	-4.0476
		60 mm	4.9697	8.7955	5.6921	2.3905	-4.0590
		70 mm	5.2401	8.7984	5.6604	2.3464	-4.2571

Tablo 24 ve Tablo 25 irdelendiğinde Tip-2 kullanılmayan çatı aralı bina modelinde yıllık soğutma enerji ihtiyacı için 40 mm RPCM23C kombinasyonun yıllık 58065.47 kWh soğutma enerji ihtiyacı % 9.4392 oranla enerji performansı kazançlı çıkmıştır. Aynı tablolara tekrar bakıldığında yıllık soğutma enerji ihtiyacı için RPCM18HC, RPCM21C, RPCM23C ve RPCM25C kombinasyonlarında enerji kazancı sağlanmıştır.

5.2.3. RTHC ve RPCM Faz Değiştiren Malzemelerin Kullanılmayan Çatı Aralı Tip-2 Bina Modelinde Aylık Isıtma ve Soğutma Enerji Performanslarının İncelenmesi

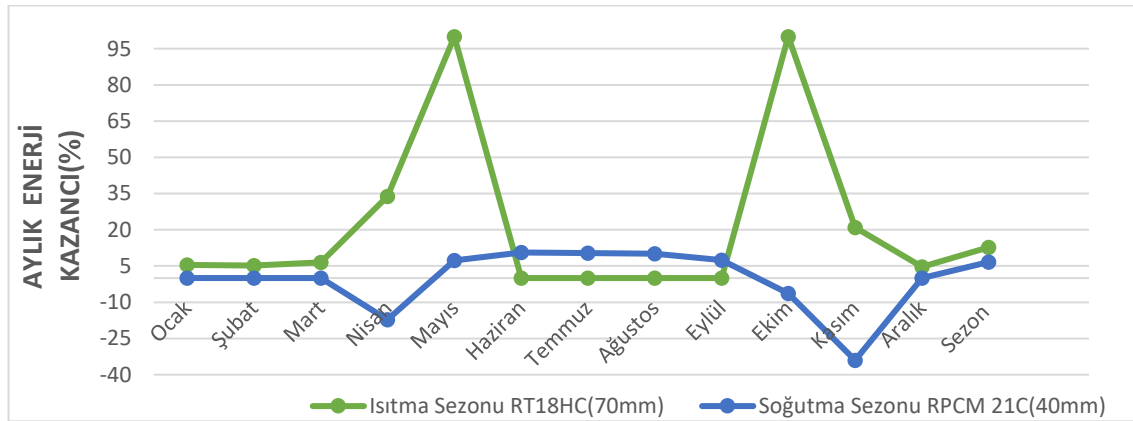
Bu kısımda yıllık olarak incelenen Tip-2 kullanılmayan çatı aralı modelindenki senaryoyu, aylık enerji ihtiyaçları (kWh) olarak incelenmiştir. Ayrıca FDM'li tiplerin FDM'siz çatı tiplerine göre aylık ve sezonluk enerji tasarruf oranları % olarak irdelenmiştir. Çalışma FDM'lerin entegre olduğu katmanlardaki teras çatılarda gün içerisinde asgari bir defa mahsus sarj ve desarj proseslerini tamamlanması beklenmektedir. Bu sebeble yapılan analizleri detaylandırabilmek için ısıtma sezonunda Tip-2 modelindeki RT18HC(70 mm) kombinasyonu incelenmiştir. Soğutma sezonunda ise Tip-2 modelindeki RPCM21C(40 mm) kombinasyonu irdelenmiştir. İncelenen tipler için yıl içerisindeki aylık ve saatlik analiz raporları oluşturulmuştur. Analizler sonucunda aylara göre RTHC ve RPCM'in ısıtma-soğutma enerji ihtiyaçları ve aylık enerji kazançları Tablo 26'da gösterilmiştir.

Tablo 26. RTHC ve RPCM en verimli erime sıcaklıklarındaki tip-2 kullanılmayan çatı aralı bina modelinde aylık ısıtma ve soğutma sezonluk verimleri

	Isıtma Sezonu			Soğutma Sezonu		
	FDM'siz (kWh)	RT18HC (70mm) (kWh)	Verim Oranı (%)	FDM'siz (kWh)	RPCM21C (40mm) (kWh)	Verim Oranı (%)
Tip-2	Ocak	13171.84	12453.86	5.45	0	0
	Şubat	13935.27	13210.45	5.20	0	0
	Mart	8607.878	8050.527	6.47	0	0
	Nisan	809.3389	535.4688	33.84	164.620	192.909
	Mayıs	6.18065	0	100	4058.28	3760.96
	Haziran	0	0	0	11915.3	10652.1
	Temmuz	0	0	0	18792.7	16837.0
	Ağustos	0	0	0	18998.6	17072.4
	Eylül	0	0	0	9333.55	8635.55
	Ekim	1.174383	0	100	832.025	884.360
	Kasım	3211.786	2539.544	20.93	22.5425	30.2134
	Aralık	9893.731	9428.834	4.70	0	0
	Yıllık	49637.2	46218.68	-	64117.7	58065.5
	Sezon	-	-	12.77	-	-
	Tasarruf Oranı					6.61

Isıtma sezonu irdelendiğinde kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki RT18HC(70 mm) kombinasyonun performansı incelenmiştir. İncelenen tipin ısıtma sezonunu oluşturan Kasım, Aralık, Ocak, Şubat, Mart ve Nisan aylar içerisinde ısıtma

sezonu tasarruf oranı % 12.77 olarak kazanca çıkmıştır. Kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki sezonluk aylara bakıldığında belirlenen tipte ısıtma sezonu için en kazançlı ayın Nisan olduğu bulunmuştur. RPCM21C(40 mm) kombinasyonu, soğutma sezonu oluşturan aylardan Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos, Eylül ve Ekim ayları incelenmiştir. Soğutma sezonu tasarruf oranı % 6.61 olarak soğutma kazancı göstermiştir. Tip-2 kullanılmayan çatı aralı bina modelinde soğutma sezonundaki aylara bakıldığında belirlenen tipte soğutma sezonu için en kazançlı ayın Haziran olduğu Şekil 60’da görülmektedir.

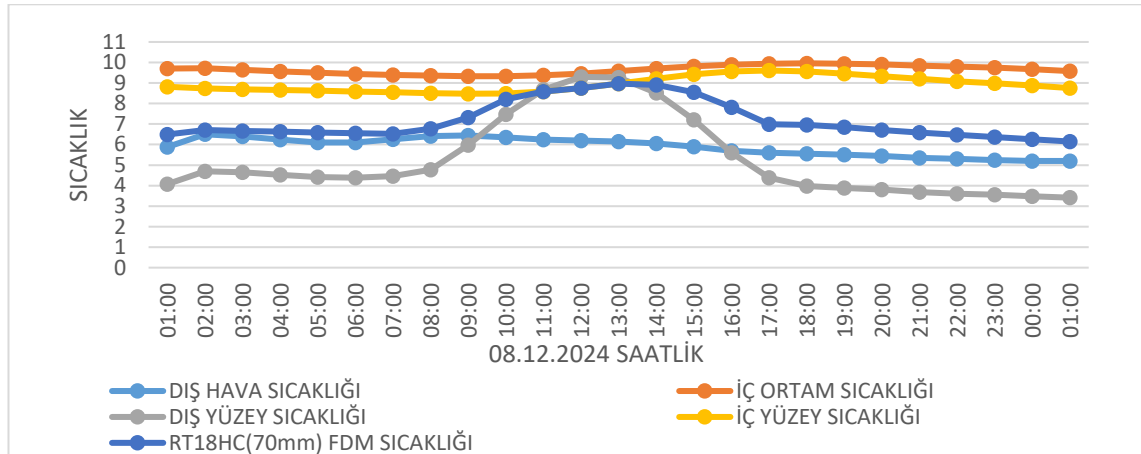


Şekil 60. Kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki belirlenen tip-2 aylık ısıtma ve soğutma sezonu için enerji kazançları

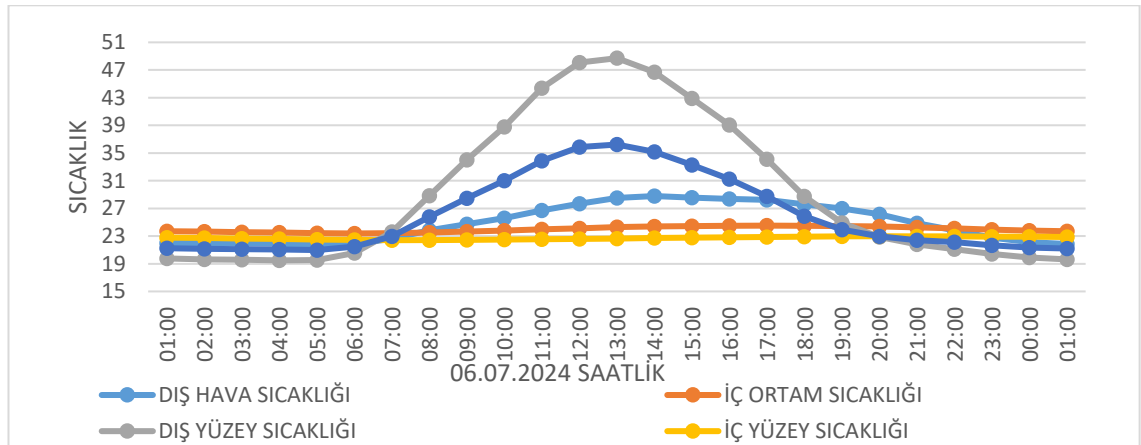
Bu bölümdeki çalışma Tablo 26’ da görüldüğü üzere ısıtma sezonundaki Tip-2 içerisindeki en verimli olarak tespit edilen RT18HC(70 mm) kombinasyonunda 08.12.2024 tarihli İstanbul iklim şartlarına göre FDM sıcaklığına, iç yüzey sıcaklığına, dış yüzey sıcaklığına ve iç ortam sıcaklığına Şekil 61’de bakılmıştır. Isıtma sezonu için iç ortam sıcaklığı RT18HC(70 mm) sıcaklığına, dış yüzey sıcaklığına ve iç yüzey sıcaklığına göre daha yüksek seyrettiği Şekil 61’de anlaşılmaktadır. İç ortam sıcaklığı gün içerisinde yaklaşık 10 °C ile 8 °C sıcaklığı arasında kalmıştır. Daha önce belirtilen gibi dış hava sıcaklığı gün içerisinde 5°C -7°C arasında görülmektedir. İç yüzey sıcaklığı ile iç ortam sıcaklığı hemen hemen daha dengeli grafik oluşturmuştur. Dış yüzey sıcaklığı saat 01:00-09:00 ve 16:00-01:00 aralıklarında dış ortam sıcaklığına göre daha düşük eğilimde olmuştur. Güneşlenmenin veya gün ışığının etkili olduğu vakit dilimlerinde saat 09:00-16:00 aralığında dış ortam sıcaklığının üzerine çıktığı tespit edilmiştir. Dış ortam sıcaklığının 5°C -7°C arasında kaldığı zaman diliminde iç ortam sıcaklığı 8°C-10°C aralığında görülmektedir.

Bu bölümdeki çalışma Tablo 26’da görüldüğü üzere soğutma sezonundaki Tip-2 içerisindeki en verimli olarak tespit edilen kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki

RPCM21C(40 mm) kombinasyonunda 06.07.2024 tarihli İstanbul iklim şartlarına göre çatı katmanındaki iç yüzey sıcaklığı, dış yüzey sıcaklığı, iç ortam sıcaklıkları incelenmiştir. Soğutma sezonu için iç ortam sıcaklığı, Tip-2 RPCM21C sıcaklığına ve dış ortam sıcaklığına göre daha konfor sıcaklık aralığında seyrettiği Şekil 62’ de görülmektedir. İç ortam sıcaklığı gün içerisinde saat 01:00’dan sonra diğer gece saat 01:00 kadar yaklaşık 23°C-25°C sıcaklık aralığında daha lineer eğilimi gösterdiği anlaşılmaktadır. İç yüzey sıcaklığı, iç ortam sıcaklığı hemen hemen paralel bir eğilimle bir grafik oluşturmuştur. Dış yüzey sıcaklığı gün boyunca dış ortam sıcaklığına göre daha yüksek eğilimde olmuştur. Güneşlenmenin veya gün ışığının etkili olduğu vakit dilimlerinde saat 07:00-20:00 aralığında dış ortam sıcaklığının göre daha keskin fark oluşturarak yaklaşık 49°C ile saat 14:00 zaman diliminde pik noktaya çıktığını Şekil 62’den anlaşılmaktadır. Dış ortam sıcaklığının 21°C-29°C arasında kaldığı zaman diliminde iç ortam sıcaklığı 23°C-25°C sıcaklık aralığında kalmıştır.



Şekil 61. 08.12.2024 tarihli kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki RT18HC(70 mm) saatlik sıcaklık değişimi



Şekil 62. 06.07.2024 tarihli kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki RPCM21C(40 mm) saatlik sıcaklık değişimi

5.3.Kullanılan Çatı Aralı Binada Entegre Edilen Faz Değiştiren Malzemelerin Termal Performanslarının İrdelenmesi

Bu bölümde kullanılan çatılı aralı bina modelindeki çatı katmanına FDM eklenmiştir. Kullanılan çatı aralı bina modelindeki çatı katmanına eklenen FDM’li ile FDM’siz arasında oluşan termal performanslar irdelenmiştir. Kullanılan RTHC malzemenin erime sıcaklığına göre RT18HC, RT21HC, RT24HC, RT25HC RT25HC ile RPCM malzemenin erime sıcaklığına göre RPCM18C, RPCM21C RPCM23C RPCM25C RPCM29C malzemeleri olmak üzere 10 farklı inceleme yapılmıştır. Yapılan incelemede FDM kombinasyonların 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm ve 70 mm, kalınlıkları hesaba katarak ayrı ayrı her çatı tipi için toplamda 70 farklı analiz yapılmıştır. Tüm farklı çatı tip modellerinin analiz sonuçlarından yıllık ısıtma soğutma performans sonuç verileri, saatlik ısıtma soğutma performans sonuç verileri ve aylık ısıtma soğutma performans sonuç verileri oluşturulmuştur. Sonuçlar DesignBuilder programı “Simulation” kısmında yıllık saatlik simülasyonu yapılarak “view EnergyPlus results” penceresinden alınmıştır. Daha sonra bina modelindeki çatı katmanında kullanılan FDM’li çatı ile kullanılmayan FDM’siz çatılı analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda simülasyonu yapılan binanın program analizlerinden elde edilen ortam sıcaklığı (°C), iç yüzey sıcaklığı (°C), dış yüzey sıcaklığı (°C), çatı sıcaklığı (°C), konfor sıcaklığı (°C) parametrelerinden faydalanılmıştır. FDM’siz ve FDM’li kullanılan çatı aralı modelleri için ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyacına etkisinin araştırılması amacıyla analiz sonuçları öncelikle yıllık bazda değerlendirilmiştir.

5.3.1. FDM’siz ve FDM’li Çatı Katmanların Detayları;

DesignBuilder yazılımında yapılan modellemenin, 2024 yılına ait İstanbul iklim verilerine göre Şekil 63, Şekil 64 ve Şekil 65’de gösterilen çatı katmanlarıyla 3 farklı kullanılan çatı aralı bina modeli belirlenmiştir. Belirlenen çatı katmanlarına arasına öncelikle 1 cm kalınlığındaki RT25HC ve RPCM25 erime sıcaklığına sahip malzemeler eklenerek FDM’siz çatılı binaya göre Tablo 27’ de gösterilen verimli çatı tipi modelleri belirlenmiştir.



Şekil 63. Kullanılan çatı aralı bina modeli için belirlenen FDM'siz çatı kesiti tip-1



Şekil 64. Kullanılan çatı aralı bina modeli için belirlenen FDM'siz çatı kesiti tip-2



Şekil 65. Kullanılan çatı aralı bina modeli için belirlenen FDM'siz çatı kesiti tip-3

Tablo 27. FDM'siz kullanılan çatı aralı bina modelindeki çatı tiplerine göre yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyaçları

		Isıtma	Soğutma
Tip-1	kWh	60471.62	79025.11
Tip-2	kWh	65431.18	81571.59
Tip-3	kWh	62049.99	74948.71
Tip-1a	kWh	60471.62	79025.11
Tip-3a	kWh	62049.99	74948.71

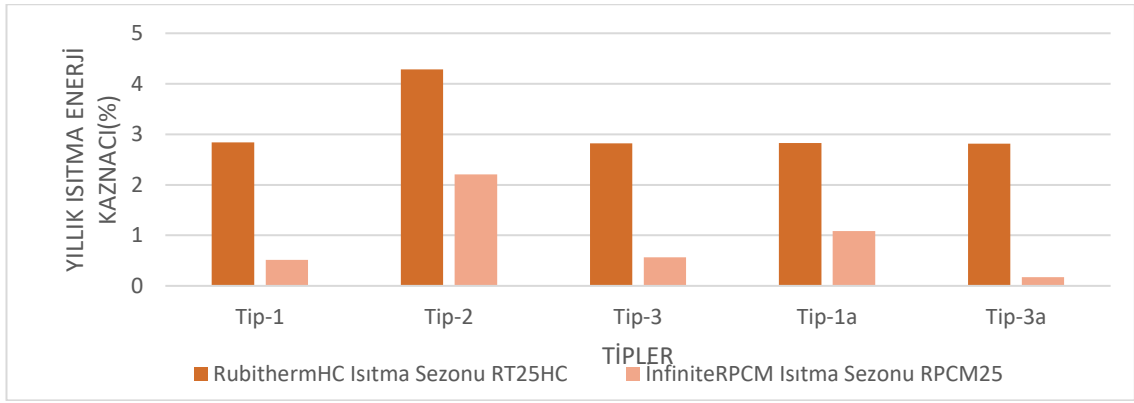
Tablo 28. FDM’li kullanılan çatı aralı bina modelindeki çatı tiplerine göre 25 °C erime sıcaklığında yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyaçları

		Isıtma	Soğutma	Isıtma	Soğutma
		RT25HC	RT25HC	RPCM25	RPCM25
Tip-1	kWh	58753.54	78484.07	60159.06	74081.83
	%	2.841	0.685	0.517	6.255
Tip-2	kWh	62629.37	80979.08	63985.97	78626.39
	%	4.282	0.726	2.209	3.611
Tip-3	kWh	60300.55	75154.45	61699.91	75084.57
	%	2.819	-0.275	0.564	-0.181
Tip-1a	kWh	58760.20	78954.39	59815.79	78684.56
	%	2.830	0.089	1.085	0.431
Tip-3a	kWh	60303.54	74768.54	61941.18	73482.49
	%	2.815	0.240	0.175	1.956

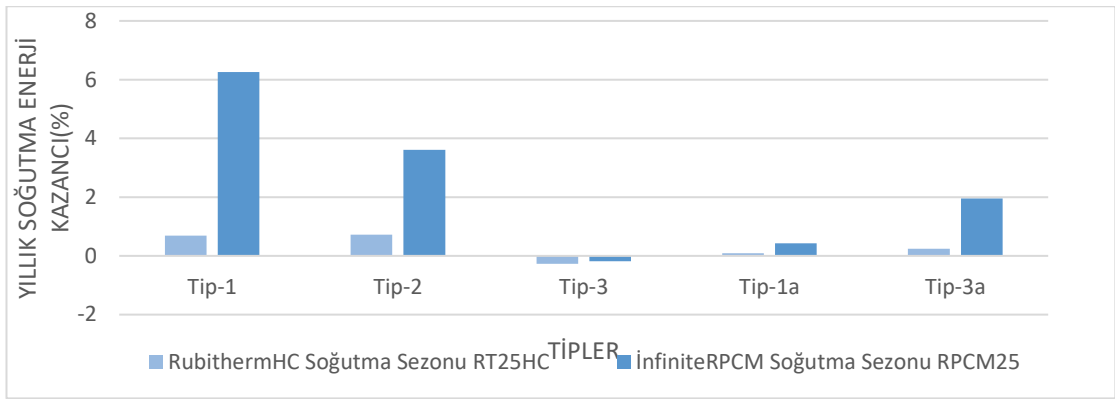
Bu bölümde ısıtma ve soğutma enerji ihtiyaçları için 25 °C erime sıcaklığında RubithermHC ve İnfiniteRPCM malzemelerin Tip-1, Tip-2, Tip-3, Tip-1a ve Tip-3a olarak 5 farklı FDM’li çatı tipi oluşturulmuştur. Daha önce oluşturduğumuz 3 tipli kullanılmayan çatı aralı bina modelinden farklı bir senaryo geliştirerek Tablo 28’de gösterildiği gibi FDM’li Tip-1a ve FDM’li Tip-3a çatı tipi oluşturulmuştur.

Tablo 28’e bakıldığında 1 cm RPCM25 kombinasyonunda yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı olarak kullanılan çatı aralı bina modelindeki çatı tiplere göre kıyaslama yapılırsa % 4.282 oranı 62629.37 kWh yıllık ısıtma enerji ihtiyacı ile en yüksek performansı, Tip-2’de göstermiştir. 1 cm RPCM25 kombinasyonunda yıllık soğutma enerji ihtiyacı olarak irdelendiğinde Tip-2 de görülmüştür.

1 cm RPCM25 kombinasyonunda yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı olarak incelenirse kullanılmayan çatı aralı bina modelindeki çatı tiplere göre kıyaslama yapılırsa % 2.209 oranı 63985.97 kWh yıllık ısıtma enerji ihtiyacı ile en yüksek performansı, Tip-2’de bulunmuştur. 1 cm RPCM25 kombinasyonunda yıllık soğutma enerji ihtiyacı olarak irdelendiğinde kullanılan çatı aralı bina modelindeki çatı tiplere göre kıyaslama yapılırsa % 6.255 oranı yıllık 74081.83 kWh soğutma enerji ihtiyacı ile en yüksek performansı, Tip-1’de görülmüştür.

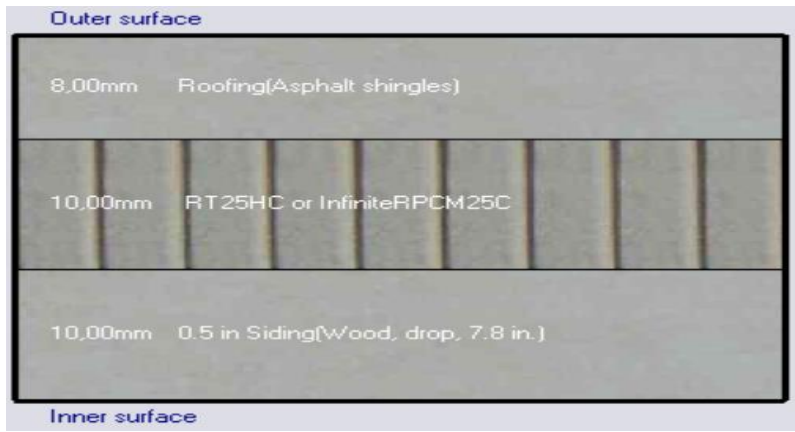


Şekil 66. RT25HC ve RPCM25C entegre kullanılan çatı aralı bina modelindeki çatı tiplerine göre yıllık ısıtma enerji kazancı



Şekil 67. RT25HC ve RPCM25C entegre kullanılan çatı aralı bina modelindeki çatı tiplerine göre yıllık soğutma enerji kazancı

Sonuç olarak bu bölümdeki çalışma kullanılan çatı aralı bina modelindeki verimli olacak tek çatı tipine indirgenmiştir. Çalışmalar sonucunda Tablo 27, Tablo 28, Şekil 66 ve Şekil 67'ye bakıldığında yıllık ısıtma enerji ihtiyacında RT25HC'nin RPCM25C göre daha verimli olmuştur. Yıllık soğutma enerji ihtiyacında RPCM25C'nin RT25HC göre daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Tablo 27, Tablo 28, Şekil 66 ve Şekil 67'de görüldüğü gibi Tip-2 yıllık ısıtma enerji ihtiyacı olarak RT25HC'nin ve yıllık enerji soğutma enerji ihtiyacı olarak RPCM25C'nin Tip-1'de en verim tipi olduğu görülmüştür. Yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyacı olarak her iki fonksiyonu ele alırsak RPCM25C malzemenin Tip-2'deki verimi, diğer tiplere göre daha performanslı olacağı düşünülmektedir. Tüm bu fonksiyonları ele alırsak ve grafiklerden anlaşıldığı üzere Tip-2 çatı tipinin daha iyi sonuçlar çıkaracağını öngörülmektedir. Kullanılan çatı aralı bina modelindeki çatı tipi aşağıdaki Şekil 68'deki gibi Tip-2 olarak devam edilmiştir.



Şekil 68. Kullanılan çatı aralı bina modelindeki FDM’li çatı kesiti tip-2

Simulasyon sonuçlarına göre seçilen en verimli FDM entegre çatı tipinde en üst katmanda hem su geçirmesini engelleyen hemde çatı kaplaması olan şingil kullanılmıştır. Faz değiştiren malzemede darbelere, rutubete dayanıklı ve iç tasarımda estetik durabilecek lambiri malzemesi arasına eklenmiştir.

Tablo 29. RTHC ve RPCM entegre tip-2 de kalınlık ve erime sıcaklığına göre ısı geçirgenlik katsayısı

			FDMsiz	RT18HC	RT21HC	RT24HC	RT25HC	RT28HC
2-di.L	10 mm	(W/m2.K)	3.185	2.747	2.747	2.747	2.747	2.747
	20 mm	(W/m2.K)	3.185	2.416	2.416	2.416	2.416	2.416
	30 mm	(W/m2.K)	3.185	2.155	2.155	2.155	2.155	2.155
	40 mm	(W/m2.K)	3.185	1.946	1.946	1.946	1.946	1.946
	50 mm	(W/m2.K)	3.185	1.773	1.773	1.773	1.773	1.773
	60 mm	(W/m2.K)	3.185	1.629	1.629	1.629	1.629	1.629
	70 mm	(W/m2.K)	3.185	1.501	1.501	1.501	1.501	1.501
			FDMsiz	RPCM18C	RPCM21C	RPCM23C	RPCM25C	RPCM29C
2-di.L	10 mm	(W/m2.K)	3.185	3.065	3.065	3.065	3.065	3.065
	20 mm	(W/m2.K)	3.185	2.954	2.954	2.954	2.954	2.954
	30 mm	(W/m2.K)	3.185	2.851	2.851	2.851	2.851	2.851
	40 mm	(W/m2.K)	3.185	2.754	2.754	2.754	2.754	2.754
	50 mm	(W/m2.K)	3.185	2.664	2.664	2.664	2.664	2.664
	60 mm	(W/m2.K)	3.185	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580
	70 mm	(W/m2.K)	3.185	2.501	2.501	2.501	2.501	2.501

Tablo 29'daki çalışma belirlenen Tip-2'deki kullanılan çatı aralı bina modelindeki malzemelerin ısı iletkenlik katsayısı(k), ısı geçirgenlik dirençleri(R) incelenmiştir. FDM'siz ve FDM'li tiplerde ısı geçirgenlik katsayısı(U) etkisine bakılmıştır.

5.3.2. RTHC ve RPCM Faz Değıştiren Malzemelerin Kullanılan Çatı Aralı Tip-2 Bina Modelinde Yıllık Isıtma ve Soğutma Enerji Performanslarının İncelenmesi

Bu bölümdeki çalışma kullanılan çatı aralı Tip-2 bina modelinde RTHC malzemenin RT18HC, RT21HC, RT24HC, RT25HC ve RT28HC erime sıcaklıkları ile RPCM malzemenin RPCM18C, RPCM21C, RPCM23C, RPCM25C ve RPCM29C erime sıcaklıklarına bakılmıştır. Bakılan erime sıcaklıklarına göre kendi içlerinde 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm ve 70 mm kalınlıklarında olmak üzere ısıtma ve soğutma enerji ihtiyaçlarını saatlik, aylık, yıllık performanslarını incelenmiştir. Her bir kalınlık ve her bir erime sıcaklığı için toplamda 70 farklı analiz yapılmıştır.

Tablo 30 ve Tablo 31'e bakıldığında yıllık ısıtma enerji ihtiyacı için kullanılan çatı aralı Tip-2 bina modelinde 70 mm RT18HC kombinasyonun 50317.43 kWh enerji ihtiyacı % 23.099 oranla enerji performansı kazançlı çıktığı görölmektedir. Yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı için RT18HC, RT21HC, RT24HC, RT25HC ve RT28HC kombinasyonlardaki aynı erime sıcaklığındaki farklı kalınlığa göre lineer bir şekilde ısıtma enerji ihtiyacı düşmüştür. Enerji kazanç yüzdesi olarak artmıştır. Soğutma enerji ihtiyacında ise RT18HC, RT21HC, RT24HC, RT25HC ve RT28HC kombinasyonları düşükte olsa verimli olduğu anlaşılmaktadır. Kullanılan çatı aralı Tip-2 bina modelinde RPCM18HC, RPCM21C, RPCM23C, RPCM25C ve RPCM29C kombinasyonları içindeki 70 mm RPCM18C FDM'li modelinde yıllık 56166.85 kWh ısıtma enerji ihtiyacı % 14.159 oranla enerji performansı en yüksek kombinasyon olarak bulunmuştur. Buradan yola çıkarak RT18HC ve RPCM18HC malzemelerin yıllık ısıtma enerji performansları diğer erime sıcaklığındaki faz değıştiren malzemelere göre daha verimli olacağı söylenebilir.

Tablo 30. RTHC ve RPCM entegreli tip-2 kullanılan çatı aralı bina modelinde erime sıcaklığına göre yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyacı (kWh)

		RT18HC	RT21HC	RT24HC	RT25HC	RT28HC	
RubithermHC için	Isıtma	10 mm	61037.65	62615,85	62739.80	62629.37	62848.28
		20 mm	57049.12	60439.90	60593.25	60446.72	60672.89
		30 mm	55052.73	58703.25	58838.26	58709.39	58877.40
		40 mm	53460.96	57281.42	57390.72	57294.32	57391.74
		50 mm	52282.63	56109.57	56194.71	56124.25	56183.70
		60 mm	51250.74	55129.53	55188.65	55143.17	55162.32
		70 mm	50317.43	54287.30	54328.32	54302.36	54290.19
	Soğutma	10 mm	80197.32	81150.00	81177.39	80979.08	80392.49
		20 mm	79404.15	80948.39	80795.26	80550.90	80327.47
		30 mm	79093.30	80810.55	80628.26	80304.90	78498.50
		40 mm	78908.46	80675.85	80483.25	80131.76	78080.84
		50 mm	78806.27	80514.90	80356.36	79971.80	77811.77
		60 mm	8729.09	80355.90	80215.97	79852.73	78031.93
		70 mm	78680.93	80191.05	80114.56	79769.07	78160.25
		RPCM18C	RPCM21C	RPCM23C	RPCM25C	RPCM29C	
İnfiniteRPCM için	Isıtma	10 mm	61037.65	62529.08	63404.61	63985.97	64635.24
		20 mm	59132.72	61321.68	62790.02	63607.44	64377.26
		30 mm	58619.43	60259.72	62051.62	63537.34	63952.78
		40 mm	58116.12	60124.96	62046.57	63068.78	63398.39
		50 mm	57504.01	60556.26	61487.69	62411.14	62921.65
		60 mm	56608.2	60105.86	60944.20	61819.19	62450.96
		70 mm	56166.85	59590.96	60342.34	61256.29	62012.30
	Soğutma	10 mm	78766.97	76667.84	76844.20	78626.39	82751.11
		20 mm	76805.89	72178.37	71166.54	74473.95	83316.62
		30 mm	76081.97	70289.23	69882.95	74069.25	84263.27
		40 mm	75218.68	68556.82	69826.56	74298.03	84473.20
		50 mm	75542.18	66587.44	69897.17	74384.83	84502.03
		60 mm	75496.78	66366.44	69998.56	74462.47	84481.59
		70 mm	74246.47	66478.17	70107.48	74559.25	84502.45

Tablo 30 ve Tablo 31'e bakarak yıllık soğutma enerji ihtiyacı irdelendiğinde Tip-2 kullanılan çatı aralı bina modelindeki RPCM21C(60 mm) kombinasyonun yıllık 66366.44 kWh soğutma enerji ihtiyacı % 18.640 oranla enerji performansı kazançlı çıkmıştır. Aynı tablolara tekrar bakıldığında yıllık soğutma enerji ihtiyacı için RPCM18HC, RPCM21C, RPCM23C ve RPCM25C kombinasyonlarında enerji kazancı sağlanmıştır.

Tablo 31. RTHC ve RPCM entegreli tip-2 kullanılan çatı aralı bina modelinde erime sıcaklığına göre yıllık ısıtma ve soğutma enerji kazançları (%)

		RT18HC	RT21HC	RT24HC	RT25HC	RT28HC	
RubithermHC için	Isıtma	10 mm	7.724	4.303	4.113	4.282	3.948
		20 mm	12.811	7.628	7.394	7.618	7.272
		30 mm	15.862	10.282	10,076	10.273	10.016
		40 mm	18.294	12.455	12.288	12.436	12.287
		50 mm	20.095	14.246	14.116	14.224	14.133
		60 mm	21.672	15.744	15.654	15.723	15.694
		70 mm	23.099	17.031	16.969	17.008	17.027
	Soğutma	10 mm	1.685	0.517	0.483	0.726	1.445
		20 mm	2.657	0.764	0.952	1.251	1.525
		30 mm	3.038	0.933	1.156	1.553	3.767
		40 mm	3.265	1.098	1.334	1.765	4.279
		50 mm	3.390	1.295	1.490	1.961	4.609
		60 mm	3.485	1.490	1.662	2.107	4.339
		70 mm	3.544	1.692	1.786	2.210	4.182
		RPCM18C	RPCM 21C	RPCM 23C	RPCM 25C	RPCM 29C	
İnfiniteRPCM için	Isıtma	10 mm	6.715	4.435	3,097	2.209	1.216
		20 mm	9.626	6.281	4,037	2.787	1.611
		30 mm	10,411	7.904	5.165	2.894	2.259
		40 mm	11.180	8.110	5.173	3.611	3.107
		50 mm	12.115	7.450	6.027	4.616	3.835
		60 mm	13.484	8.139	6.858	5.520	4.555
		70 mm	14.159	8.926	7.777	6.381	5.225
	Soğutma	10 mm	3.438	6.012	5.795	3,611	-1.446
		20 mm	5.842	11.515	12.756	8,701	-2.139
		30 mm	6.730	13.831	14.329	9,197	-3.300
		40 mm	7.788	15.955	14.398	8,917	-3.557
		50 mm	7.392	18.369	14.312	8,810	-3.592
		60 mm	7.447	18.640	14.188	8,715	-3.567
		70 mm	8.980	18.503	14.054	8,597	-3.593

5.3.3. RTHC ve RPCM Faz Değiştiren Malzemelerin Kullanılan Çatı Aralı Tip-2 Bina Modelinde Aylık Isıtma ve Soğutma Enerji Performanslarının İncelenmesi

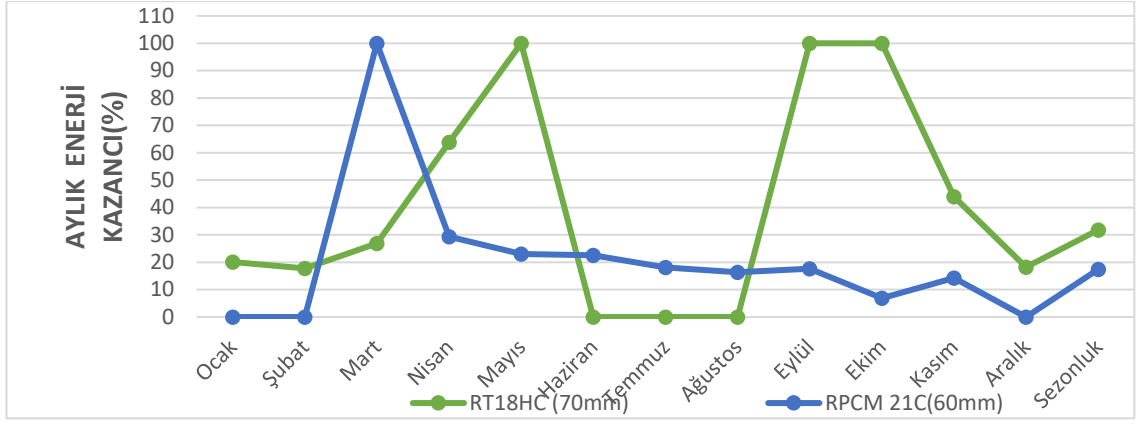
Bu bölümde yıllık olarak kullanılan çatı aralı bina modelin çatı tipindeki senaryoyu aylık enerji ihtiyaçları (kWh) olarak irdelenmiştir. Ayrıca FDM’li tiplerin FDM’siz çatı tiplerine göre aylık ve sezonluk enerji tasarruf oranları % olarak bakılmıştır. Çalışmada FDM’lerin entegre olduğu katmanlardaki teras çatılarda gün içerisinde asgari bir defa mahsus sarj ve desarj proseslerini tamamlanması beklenmektedir. Bundan dolayı yapılan

analizleri detaylandırmak için ısıtma sezonunda bina modelindeki RT18HC(70 mm) kombinasyonu incelenmiştir. Soğutma sezonunda ise bina modelindeki RPCM21C(60 mm) kombinasyonuna bakılmıştır. Belirlenen tip için yıl içerisindeki aylık ve saatlik analiz raporları bulunmuştur. Analizler sonucunda aylara göre RTHC ve RPCM'in ısıtma-soğutma enerji ihtiyaçları ve enerji kazançları Tablo 32'de belirtilmiştir.

Tablo 32. RTHC ve RPCM en verimli erime sıcaklıklarındaki tip-2 kullanılan çatı aralı bina modelinde aylık ısıtma ve soğutma sezonluk verimleri

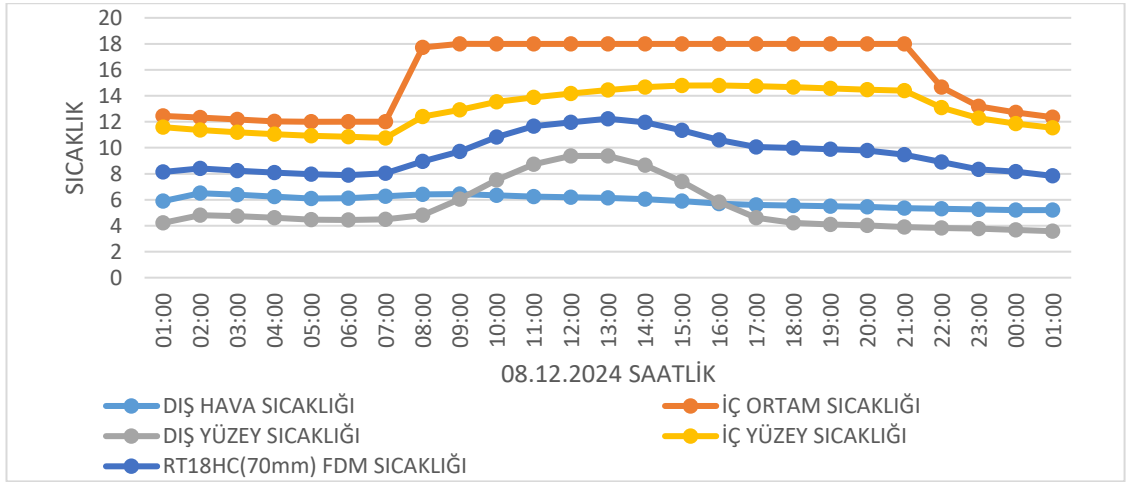
	Isıtma Sezonu			Soğutma Sezonu		
	FDM'siz (kWh)	RT18HC (70mm) (kWh)	Verim Oranı (%)	FDM'siz (kWh)	RPCM21C (60mm) (kWh)	Verim Oranı (%)
TİP-2	Ocak	17166.4	13717.0	20.09	0	0
	Şubat	17993.2	14789.2	17.81	0	0
	Mart	11284.7	8249.18	26.90	0.312	0
	Nisan	1373.30	497.16	63.80	400.82	283.10
	Mayıs	90.837	0.056	99.94	5816.011	4479.74
	Haziran	0	0	0	15632.93	12101.44
	Temmuz	0	0	0	23512.03	19242.79
	Ağustos	0	0	0	23347.12	19532.94
	Eylül	0.03	0	100	11653.77	9604.16
	Ekim	98.02	0.062	99.94	1158.06	1078.92
	Kasım	4597.42	2575.24	43.99	50.54	43.339
	Aralık	12827.4	10489.6	18.23	0	0
	Yıllık	65431.2	50317.4	-	81571.59	66366.44
	Sezon	-	-	31.80	-	-
	Tasarruf Oranı					17.41

Isıtma sezonu incelendiğinde kullanılan çatı aralı bina modelindeki 70 mm RT18HC kombinasyonu termal performansına bakılmıştır. Bakılan tipin ısıtma sezonu oluşturan aylardan Kasım, Aralık, Ocak, Şubat, Mart ve Nisan aylar içerisinde ısıtma sezonu enerji tasarruf oranı % 31.80 olarak kazançlı görülmüştür. Kullanılan çatı aralı bina modelindeki ısıtma sezonundaki aylara bakıldığında belirlenen tipte ısıtma sezonu için en kazançlı ayın Nisan olduğu Şekil 69'da görülmektedir. 60 mm RPCM21C kombinasyonu, soğutma sezonu oluşturan aylardan Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos, Eylül ve Ekim aylarına bakılmıştır. Soğutma sezonu tasarruf oranı % 17.41 olarak soğutma kazancı bulunmuştur. Kullanılan çatı aralı bina modelinde soğutma sezonundaki aylara bakıldığında belirlenen tipte soğutma sezonu için en kazançlı ayın Mayıs olduğu Şekil 69'dan anlaşılmaktadır.



Şekil 69. Kullanılan çatı aralı bina modelindeki belirlenen tip-2 aylık ısıtma ve soğutma sezonu için enerji kazançları

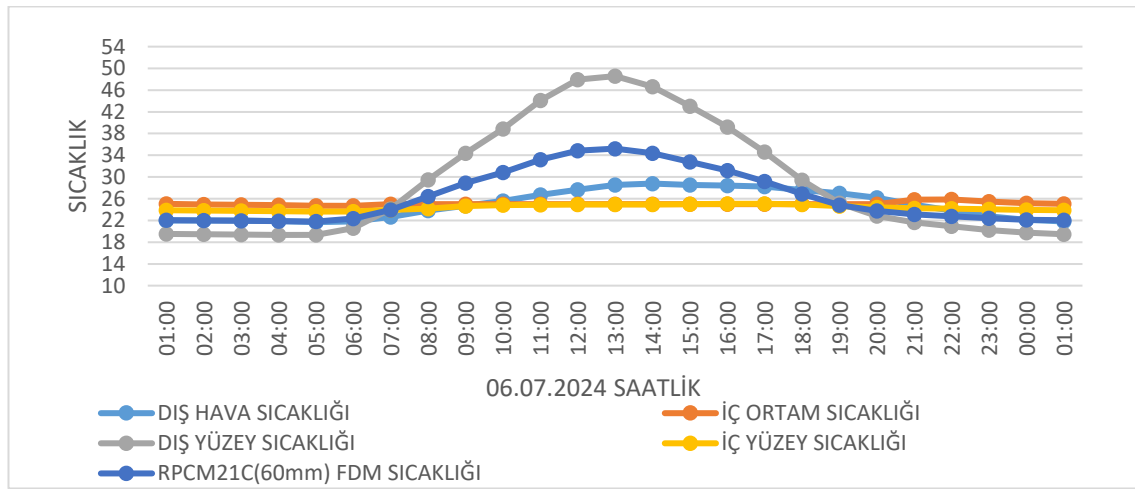
Bu bölümdeki çalışma Tablo 32’de görüldüğü üzere ısıtma sezonundaki Tip-2 içerisindeki en verimli olarak tespit edilen RT18HC(70 mm) kombinasyonunda 08.12.2024 tarihli İstanbul iklim şartlarına göre FDM sıcaklığı, iç yüzey sıcaklığı, dış yüzey sıcaklığı, iç ortam sıcaklığı irdelenmiştir. Isıtma sezonu için iç ortam sıcaklığı, RT18HC(70 mm) sıcaklığına, dış yüzey sıcaklığına ve iç yüzey sıcaklığına göre daha yüksek seyrettiği Şekil 70’den anlaşılmaktadır. İç ortam sıcaklığı gün içerisinde yaklaşık 12 °C ile 18 °C sıcaklığı arasında kaldığı, daha önce belirtilen gibi dış hava sıcaklığı gün içerisinde 5°C -7°C arasında kalmıştır.



Şekil 70. 08.12.2024 tarihli kullanılan çatı aralı bina modelindeki RT18HC(70 mm) saatlik sıcaklık değişimi

Bu bölümdeki çalışma Tablo 32’de görüldüğü üzere soğutma sezonundaki en verimli olarak tespit edilen Tip-2 kullanılan çatı aralı bina modelindeki RPCM21C(60 mm) kombinasyonunda 06.07.2024 tarihli İstanbul iklim şartlarına göre iç yüzey sıcaklığı, dış yüzey sıcaklığı, iç ortam sıcaklığı incelenmiştir. Soğutma sezonu için iç ortam sıcaklığı RPCM21C sıcaklık ve dış ortam sıcaklığına göre daha konforlu sıcaklık

aralığında kaldığı Şekil 71’de görülmektedir. İç ortam sıcaklığı saat 13:00’den 01:00’a kadar yaklaşık 23°C-25°C sıcaklık aralığında lineerlik gösterdiği anlaşılmaktadır. İç yüzey sıcaklığı, iç ortam sıcaklığı hemen hemen paralel bir eğilimle bir grafik oluşturdukları, dış yüzey sıcaklığı gün boyunca dış ortam sıcaklığına göre daha yüksek eğilimde olmuştur. Güneşlenmenin veya gün ışığının etkili olduğu vakit dilimlerinde saat 07:00-20:00 aralığında dış ortam sıcaklığına göre daha keskin fark oluşturarak yaklaşık 48°C ile saat 13:00 sularında pik noktaya çıktığı anlaşılmaktadır. Dış ortam sıcaklığının 21°C -29°C arasında seyrettiği zaman diliminde iç ortam sıcaklığı 23°C-25°C arasında kaldığını göstermektedir.

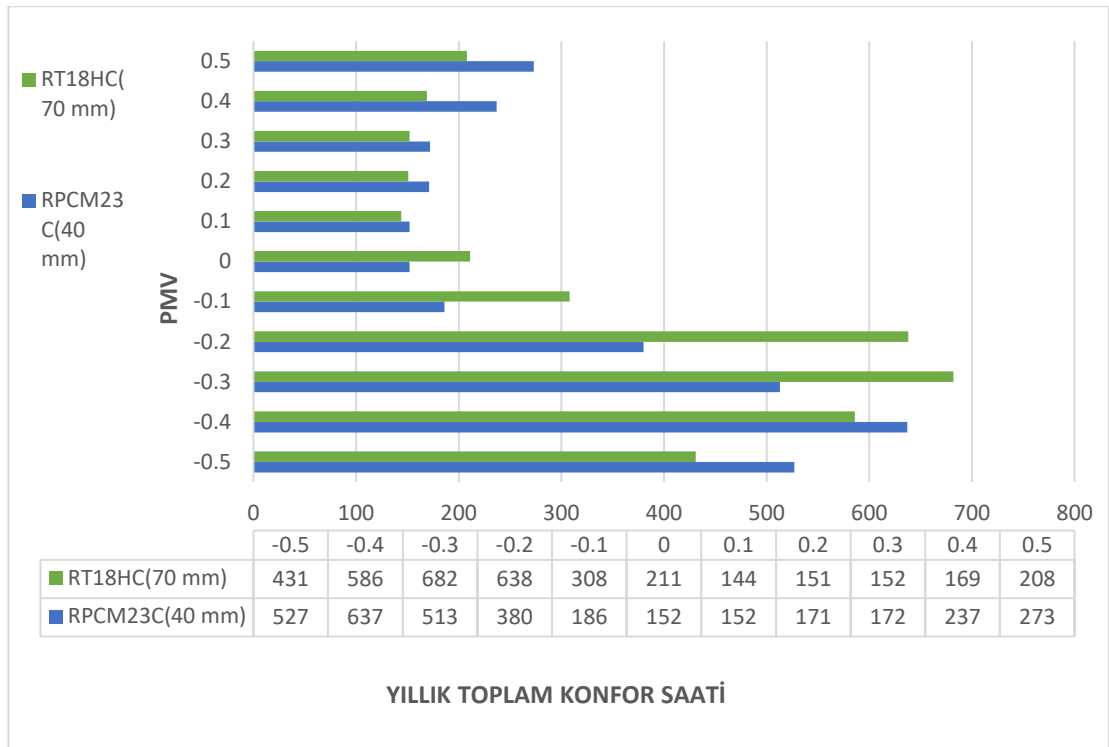


Şekil 71. 06.07.2024 tarihli kullanılan çatı aralı bina modelindeki RPCM21C(70 mm) saatlik sıcaklık değişimi

5.4. Bina Modellerindeki Verimli Çatı Tiplerindeki FDM’lerin Isıl Konfor Analizleri

5.4.1. PMV Analizleri

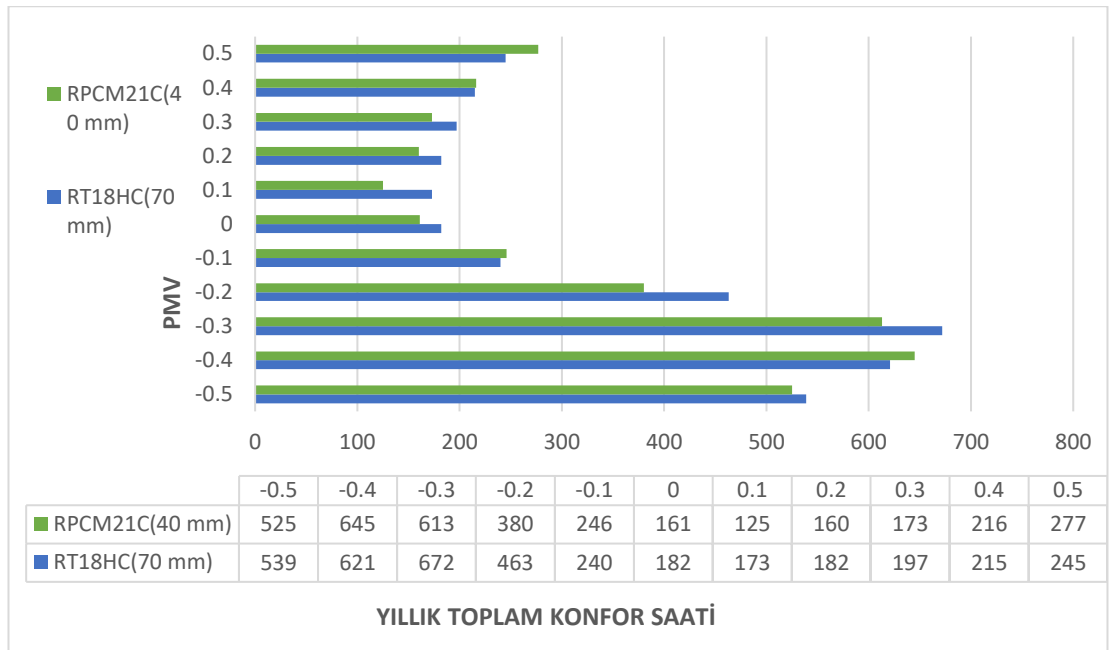
Yapılan çalışma DesignBuilder modelleme programında yapılan teras çatılı, kullanılmayan çatı aralı ve kullanılan çatı aralı üç boyutlu bina modellerin verimli çatı tipleri EnergyPlus ile simüle edilmiştir. PMV değerleri programdan alınmıştır. Metaryel ve yöntem bölümünde belirtilen Tablo 8’deki PMV Termal Algı Ölçeği dikkate alınmıştır. Ölçekte 0 olarak belirtilen konforlu alana bakılmıştır. EnergyPlus simülasyon sonucundan çıkan 8760 saat içerisindeki PMV indeksleri -0.5 ile 0.5 arasında kalan konforlu saat çizelgesine bakılmıştır. RTHC ile RPCM malzemeleri ile PMV sonuçların yıl içerisinde ne kadar konforlu saat oluşturduğunu Şekil 72, Şekil 73 ve Şekil 74’de gösterilmiştir.



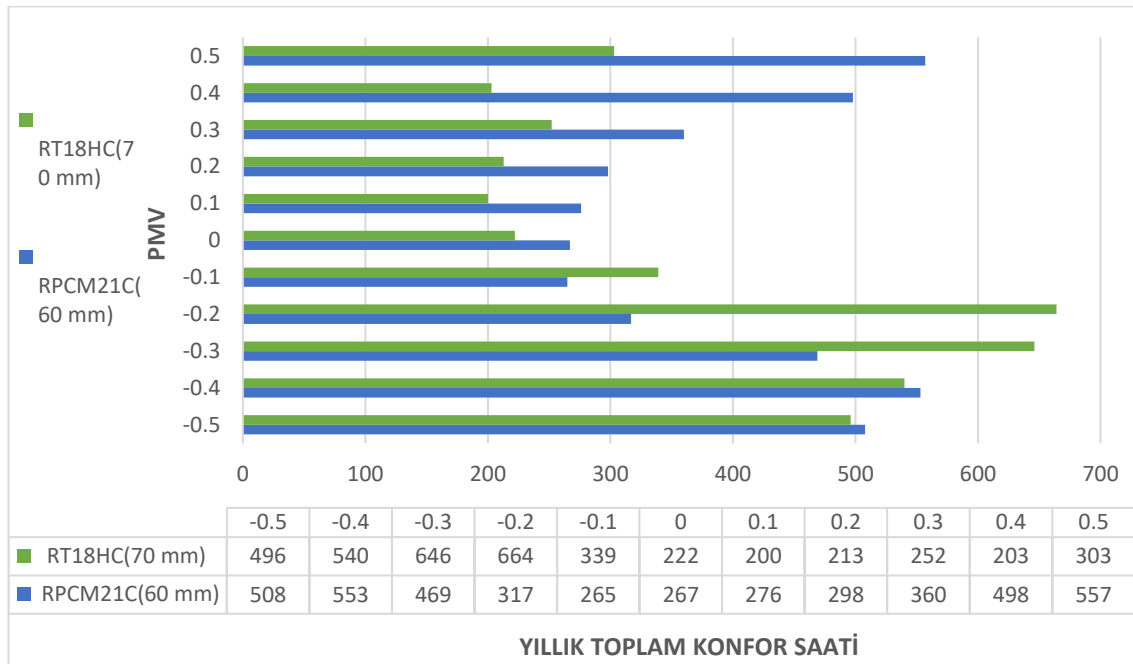
Şekil 72. Teras çatı bina modelinde FDM’li tip-1 çatı tipinde PMV ile yıllık toplam konfor saati

Şekil 72’ye bakıldığında teras çatılı RT18HC(70mm) Tip-1 bina modelinde yıl içerisinde toplamda konforlu 3680 saat bulunmuştur. Aynı modeldeki RPCM23C(40mm) kombinasyonu toplamda 3400 saat görülmüştür. PMV termal konfor his olarak en yüksek sayabilecek 0 noktasında en fazla 211 saat ile RT18HC(70 mm) kombinasyonun, RPCM23C(40 mm) kombinasyonuna göre daha avantajlı olduğu görülmüştür. PMV termal konfor -0.5 ile 0.5 arasındaki en yüksek indeksi, -0,3 değerinde 682 konfor saat ile RT18HC(70 mm) kombinasyonunda bulunmuştur.

Şekil 73 incelendiğinde kullanılmayan çatı aralı RT18HC(70 mm) Tip-2 bina modelinde yıl içerisinde toplamda konforlu 3729 saate çıkmıştır. Aynı modeldeki RPCM21C(40 mm) kombinasyonu toplamda 3521 saat bulunmuştur. PMV termal konfor his olarak en yüksek sayabilecek 0 noktasında en fazla 182 saat ile RT18HC(70 mm) kombinasyonun, RPCM21C(40 mm) kombinasyonuna göre daha konforlu olduğu tespit edilmiştir. PMV termal konfor -0.5 ile 0.5 arasındaki en yüksek indeksi, -0.3 değerinde 672 konfor saat ile RT18HC(70 mm) kombinasyonunda bulunmuştur.



Şekil 73. Kullanılmayan çatı aralı bina modelinde FDM’li tip-2 çatı tipinde PMV ile yıllık toplam konfor saati



Şekil 74. Kullanılan çatı aralı bina modelinde FDM’li tip-2 çatı tipinde PMV ile yıllık toplam konfor saati

Şekil 74 irdelendiğinde kullanılan çatı aralı RT18HC(70 mm) Tip-2 bina modelinde yıl içerisinde toplamda konforlu 4078 saat bulunmuştur. Aynı modeldeki RPCM21C(60 mm) kombinasyonu toplamda 4368 konforlu saat olarak görülmüştür. PMV termal konfor his olarak en yüksek sayılabilecek 0 noktasında en fazla 267 saat ile RPCM21C(60 mm) malzemenin RT18HC(70 mm) malzemeye göre daha konforlu

olduğu anlaşılmaktadır. PMV termal konfor -0.5 ile 0.5 arasındaki en yüksek indeksi, -0.2 değerinde 646 konfor saat ile RT18HC(70 mm) kombinasyonunda görülmüştür.

Şekil 72, Şekil 73 ve Şekil 74’de kullanılan çatı modellerin FDM’li ve FDM’siz durumlarıyla kıyaslama yapılmıştır. Yapılan incelemede kullanılan çatı aralı RPCM21C(60 mm) Tip-2 bina modeli % 23.04 en yüksek konfor oranı görülmüştür. İrdelemeye devam edildiğinde kullanılmayan çatı aralı RPCM21C(40 mm) Tip-2 bina modelinde % 4.60 en düşük konfor oranı tespit edilmiştir. Sonuç olarak Şekil 72, Şekil 73 ve Şekil 74’ü beraber değerlendirildiğinde daha önce günlük olarak belirlenen iç ortam sıcaklığı, iç yüzey sıcaklığı ve bağıl nem gibi parametreler PMV indeksini etkilemektedir.

5.4.2. PPD Analizleri

Yapılan çalışma daha önceki kısımlarda DesignBuilder modelleme programında oluşturulan teras çatı, kullanılmayan çatı aralı ve kullanılan çatı aralı bina modellerdeki verimli çatı tiplerine bakılmıştır. İstanbul için 08.12.2024 ve 06.07.2024 tarihleri içerisindeki çatı modellerin tahmini memnuniyetsizlik indeksi(PPD) sonuçları oluşturulmuştur. Önce belirlenen bina modellerindeki çatı tiplerinde FDM’siz haliyle PPD sonuçlar alınmış sonradan FDM’li PPD sonuçlarla kıyaslanmıştır.

Tablo 33’e bakıldığında 08.12.2024 tarihli İstanbul ili Csa iklim sınıfında teras çatılı bina modelinde en düşük olarak görülen tahmini memnuniyetsizlik indeksi(PPD), Tip-3 RT18HC(70mm) kombinasyonun saat 10:00-21:00 aralığındaki % 7 indeksi ile gerçekleşmiştir. Kullanılmayan çatı aralı bina modelinde en düşük olarak görülen tahmini memnuniyetsizlik indeksi (PPD), Tip-2 RT18HC(70 mm) kombinasyonun saat 11:00-21:00 aralığındaki % 9 indeksi ile tespit edilmiştir. Kullanılan çatı aralı bina modelinde en düşük olarak görülen tahmini memnuniyetsizlik indeksi (PPD), Tip-2 RT18HC(70 mm) kombinasyonun saat 15:00-21:00 aralığındaki % 8 indeksi ile görülmüştür. Bina modellerini 08.12.2024 tarihli Csa iklim sınıfında birbirleriyle karşılaştırıldığında teras çatılı bina modelinde tahmini memnuniyetsizlik indeksi (PPD) daha düşük eğilim gösterdiği söylenebilir.

Tablo 34 irdelendiğinde 06.07.2024 tarihli İstanbul ili Csa iklim sınıfında teras çatılı bina modelinde en düşük olarak görülen tahmini memnuniyetsizlik indeksi (PPD), Tip-1 RPCM23C(40 mm), Tip-2 RPCM21C(70 mm) ve Tip-3 RPCM23C(70 mm) kombinasyonların saat 07:00-08:00 aralığındaki % 22 indeksi ile bulunmuştur. Kullanılmayan çatı aralı bina modelinde en düşük olarak görülen tahmini memnuniyetsizlik indeksi (PPD), Tip-2 RPCM21C(40 mm) kombinasyonun saat 07:00-

08:00 aralığındaki % 23 indeksi olduğu anlaşılmaktadır. Kullanılan çatı aralı bina modelinde en düşük olarak görülen tahmini memnuniyetsizlik indeksi (PPD), Tip-2 RPCM21C(60 mm) kombinasyonun saat 04:00-06:00 aralığındaki % 14 indeksi görülmektedir. Bina modellerini 06.07.2024 tarihli Csa iklim sınıfında birbirleriyle kıyaslanırsa kullanılan çatı aralı bina modelinde tahmini memnuniyetsizlik indeksi (PPD) daha düşük gerçekleştiğini ifade edilebilir.

Bina modelleri olan teras çatılı, kullanılmayan çatı aralı ve kullanılan çatı aralı olmak üzere 3 farklı bina modelindeki tahmini memnuniyetsizlik indeks (PPD) kazancı incelenmiştir. 08.12.2024 ve 06.07.2024 tarihli zaman dilinde % kazanç olarak Şekil 75 ve Şekil 76' da gösterilmiştir. Şekil 75'e bakıldığında 08.12.2024 tarihli Csa iklim sınıfında teras çatılı Tip-3 bina modelindeki RT18HC(70 mm) kombinasyonun diğer modellemelere göre daha yüksek seviyede kalmıştır. PPD indeks kazancı olarak kullanılmayan çatı aralı Tip-2 bina modelindeki RT18HC(70 mm) kombinasyonun daha düşük olarak bulunmuştur. Teras çatılı Tip-3 bina modelindeki RT18HC(70 mm) kombinasyonunda saat 02:00 zaman diliminde % 54.42 PPD indeks kazanç oranıyla en yüksek seviyeye çıkmıştır. Kullanılmayan çatı aralı Tip-2 bina modelindeki RT18HC(70 mm) kombinasyonunda saat 17:00-18:00 aralığında % 3.81 PPD indeks kazanç oranıyla düşük seviyede görülmüştür. Şekil 75 irdelendiğinde gece saatlerinde PPD indeks kazancı gün ışığı zaman diliminden daha verimli olduğu anlaşılmıştır.

06.07.2024 tarihli Csa iklim sınıfında kullanılan çatı aralı Tip-2 bina modelindeki RPCM21C(60 mm) kombinasyonun diğer modellemelere göre daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir. PPD indeks kazancı olarak kullanılmayan çatı aralı Tip-2 bina modelindeki RPCM21C (40 mm) kombinasyonun diğer modellemelere göre çoğunlukla düşük bulunmuştur. Kullanılan çatı aralı Tip-2 bina modelindeki RPCM21C (60 mm) kombinasyonun saat 13:00 sularında % 72.22 PPD indeks kazanç oranıyla en yüksek seviyeye çıkmıştır. Kullanılan çatı aralı Tip-2 bina modelindeki RPCM21C (60 mm) kombinasyonun saat 05:00 sularında % 16.71 PPD indeks kazanç oranıyla en düşük seviyede görülmüştür. Şekil 76'ya bakıldığında kullanılan çatı aralı Tip-2 bina modelindeki RPCM21C (60 mm) kombinasyonun PPD indeks kazancı gün içerisinde diğer modellemelere göre daha değişken olduğu görülmüştür. Gün ortasında en yüksek seviyeye çıktıktan sonra saat 13:00'de düşüşe geçtiği anlaşılmaktadır.

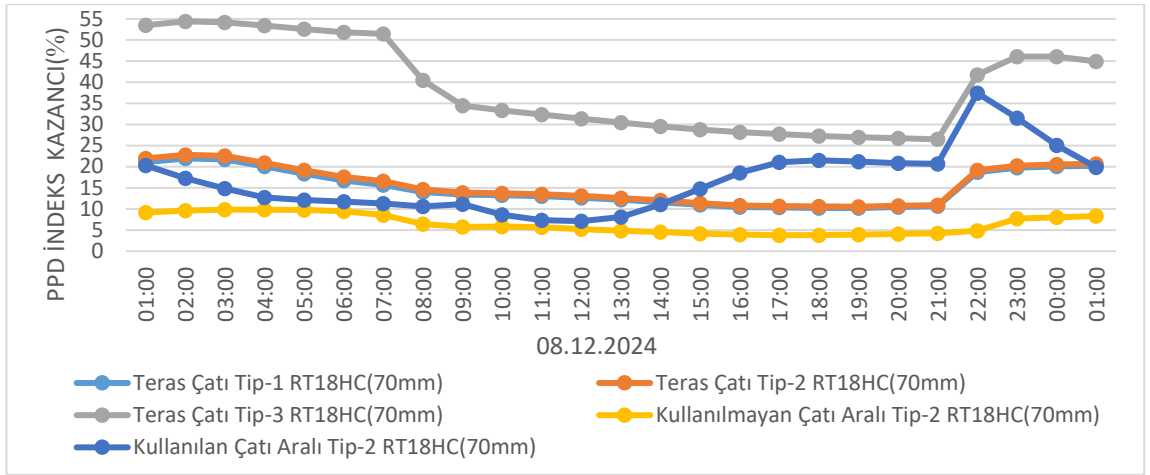
Tablo 33. 08.12.2024 tarihli bina modellerindeki verimli çatı tiplerin saatlik PPD indeksi

8.12.2024	Teras Çatı						Kullanılmayan Çatı Aralı		Kullanılan Çatı Aralı	
	Tip1		Tip-2		Tip-3		Tip-2		Tip-2	
	FDMsiz	RT18HC (70mm)	FDMsiz	RT18HC (70mm)	FDMsiz	RT18HC (70mm)	FDMsiz	RT18HC (70mm)	FDMsiz	RT18HC (70mm)
01:00	30	24	30	23	31	14	27	24	35	28
02:00	30	24	30	23	31	14	27	25	35	29
03:00	31	24	31	24	31	14	28	25	35	30
04:00	31	25	31	25	32	15	29	26	36	31
05:00	32	26	32	26	32	15	30	27	36	32
06:00	33	27	33	27	33	16	31	28	37	32
07:00	33	28	33	27	33	16	31	29	37	33
08:00	14	12	14	12	14	9	13	13	15	13
09:00	12	10	12	10	12	8	11	10	12	11
10:00	11	10	11	10	11	7	10	10	11	10
11:00	11	9	11	9	11	7	10	9	10	9
12:00	10	9	10	9	10	7	10	9	10	9
13:00	10	9	10	9	10	7	9	9	10	9
14:00	10	9	10	9	10	7	9	9	10	9
15:00	10	9	10	9	10	7	9	9	10	8
16:00	10	9	10	9	10	7	9	9	10	8
17:00	10	9	10	9	10	7	9	9	11	8
18:00	10	9	10	9	10	7	9	9	11	8
19:00	10	9	10	9	10	7	9	9	11	8
20:00	10	9	10	9	10	7	9	9	11	8
21:00	10	9	10	9	10	7	9	9	11	8
22:00	19	16	19	15	20	12	17	16	27	17
23:00	26	21	26	21	27	15	23	22	34	24
00:00	29	23	29	23	29	16	26	24	35	26
01:00	31	24	31	24	31	17	27	25	36	29

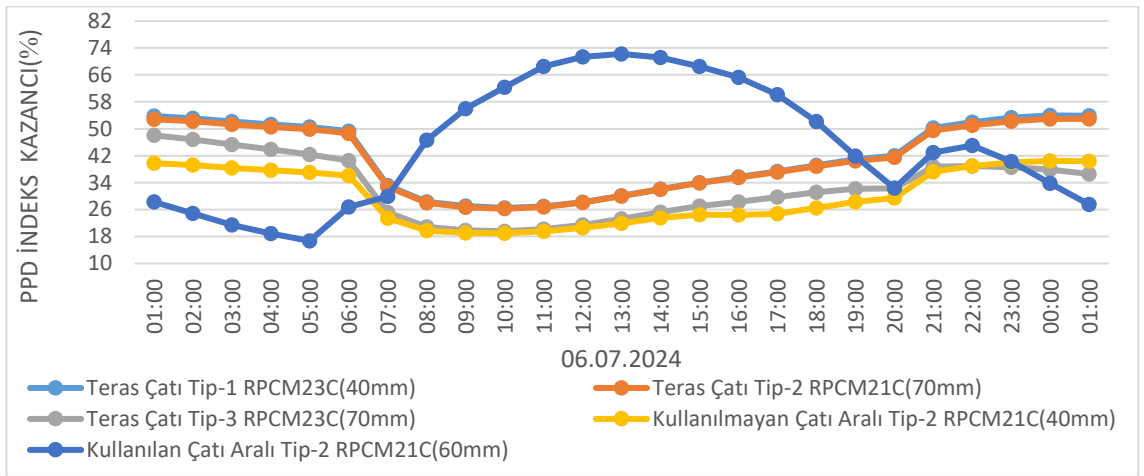
08.12.2024 ve 06.07.2024 tarihli 2 farklı zaman diliminde PPD kazançları karşılaştırıldığı zaman tüm bina modellerinde 06.07.2024 tarihli PPD indeks kazançları daha kazançlı olduğu görülmüştür. İstanbul ili 2024 yılı Csa iklim sınıfına göre çatılarda kullanılan FDM malzemelerin ısıl konforu parametresini ölçen PPD analizlerinde yaz sezonunda daha kazançlı çıktığı sonucuna varılmıştır.

Tablo 34. 06.07.2024 tarihli bina modellerindeki verimli çatı tiplerin saatlik PPD indeksi

2024.07.06	Teras Çatı						Kullanılmayan Çatı Aralı		Kullanılan Çatı Aralı	
	Tip1		Tip-2		Tip-3		Tip-2		Tip-2	
	FDMsiz	RPCM23C (40mm)	FDMsiz	RPCM21C (70mm)	FDMsiz	RPCM23C (70mm)	FDMsiz	RPCM21C (40mm)	FDMsiz	RPCM21C (60mm)
01:00	66	31	66	31	57	29	55	33	21	15
02:00	64	30	64	31	55	29	54	33	20	15
03:00	63	30	63	30	53	29	53	32	19	15
04:00	60	29	60	30	52	29	51	32	18	14
05:00	58	29	58	29	49	28	49	31	17	14
06:00	57	29	57	29	48	29	49	31	19	14
07:00	33	22	33	22	30	22	30	23	22	16
08:00	31	22	31	22	28	22	29	23	30	16
09:00	31	23	31	23	29	23	30	24	39	17
10:00	32	24	32	24	30	24	30	24	47	18
11:00	33	24	33	24	30	24	30	24	56	18
12:00	34	24	34	24	31	24	30	24	61	18
13:00	35	25	35	25	32	25	31	24	63	17
14:00	38	26	38	26	34	26	32	24	61	18
15:00	41	27	41	27	37	27	34	26	56	18
16:00	44	28	44	28	39	28	36	27	52	18
17:00	45	28	45	28	40	28	37	28	46	18
18:00	44	27	44	27	39	27	37	27	37	18
19:00	41	24	41	25	36	25	35	25	29	17
20:00	39	23	39	23	34	23	33	23	23	16
21:00	63	32	63	32	55	34	53	33	31	18
22:00	74	35	74	36	64	39	62	38	33	18
23:00	71	33	71	34	62	38	59	36	28	17
00:00	69	32	69	32	59	36	57	34	23	15
01:00	66	31	66	31	57	36	55	33	21	15



Şekil 75. 08.12.2024 tarihli bina modellerindeki verimli çatı tiplerinin saatlik PPD indeks kazancı



Şekil 76. 06.07.2024 tarihli bina modellerindeki verimli çatı tiplerinin saatlik PPD indeks kazancı

5.5. CO₂ Emisyon Azalımı Bulguları

Bu bölümdeki çalışma daha önceki konu başlıklarında yer alan bina modellemelerinde oluşan enerji kazancı sonucunda yıllık kg CO₂ emisyon azalımı miktarını Tablo 35’de gösterilmiştir. Ayrıca kullanılan çatı modellerindeki yıllık olarak bulunan kg CO₂ miktarı, kullanılan FDM’nin kapladığı çatı alana(m²) bölünmesi ile yıllık m² düşen kg CO₂ tespiti Tablo 36’da yapılmıştır. Oluşturan 3 farklı teras çatı modelindeki yıllık soğutma enerji ihtiyacı için en verimli olarak belirlenen Tip-1 RPCM21C(40 mm), Tip-2 RPCM21C(40 mm), Tip-3 RPCM23C(70 mm) kombinasyonları ve yıllık ısıtma enerji ihtiyacı için en verimli olarak tespit edilen Tip-1, Tip2 ve Tip-3’deki RT18HC(70 mm) kombinasyonları ele alınmıştır. Kullanılmayan çatı modelindeki yıllık soğutma enerji ihtiyacı için en verimli olarak Tip-2 RPCM21C(40 mm) kombinasyonu ve yıllık ısıtma enerji ihtiyacı için en verimli olarak tespit edilen Tip-2 RT18HC(70 mm) kombinasyonuna bakılmıştır. Kullanılan çatı modelindeki yıllık

soğutma enerji ihtiyacı için en verimli olarak Tip-2 RPCM21C(60 mm) kombinasyonu ve yıllık ısıtma enerji ihtiyacı için en verimli olarak tespit edilen Tip-2 RT18HC(70 mm) kombinasyonu incelenmiştir. Bina modellerindeki toplam enerji kazançlarına göre CO₂ emisyon azalım miktarlarına bakılmıştır. Çalışma bina modelinde enerji ihtiyacı doğalgaz, kömür, fuel-oil ve elektrik yakıtlı CO₂ emisyonu etkisi incelenmiştir. Kullanılan yakıtlara göre kWh birim enerji başına düşen kg CO₂ emisyon katsayısı Tablo 9’da belirtilmiştir.

Tablo 35. Çatı ve yakıt tiplerine göre çatı entegre FDM’nin sağlayacağı yıllık CO₂ emisyon azalım miktarları(kg CO₂)

		FDMli Çatı	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	Elektrik
Teras Çatılı Bina Modeli	Tip-1	RPCM21C (40 mm)	1694,83	3136,16	2390,15	4468,85
		RT18HC (70 mm)	2112,07	3908,23	2978,56	5569,01
	Tip-2	RPCM21C (70 mm)	2972,31	5500,04	4191,71	7837,23
		RT18HC (70 mm)	2052,83	3798,61	2895,02	5412,81
	Tip-3	RPCM23C (70 mm)	1862,85	3447,07	2627,10	4911,87
		RT18HC (70 mm)	1499,08	2773,94	2114,09	3952,70
Kullanılmayan Çatı Aralı Bina Modeli	Tip-2	RPCM21C (40 mm)	1767,07	3269,84	2492,02	4659,33
		RT18HC (70 mm)	1055,46	1953,06	1488,475	2783
Kullanılan Çatı Aralı Bina Modeli	Tip-2	RPCM21C (60 mm)	4804,13	8889,70	6775,06	12667,3
		RT18HC (70 mm)	4213,03	7795,91	5941,46	11108,7

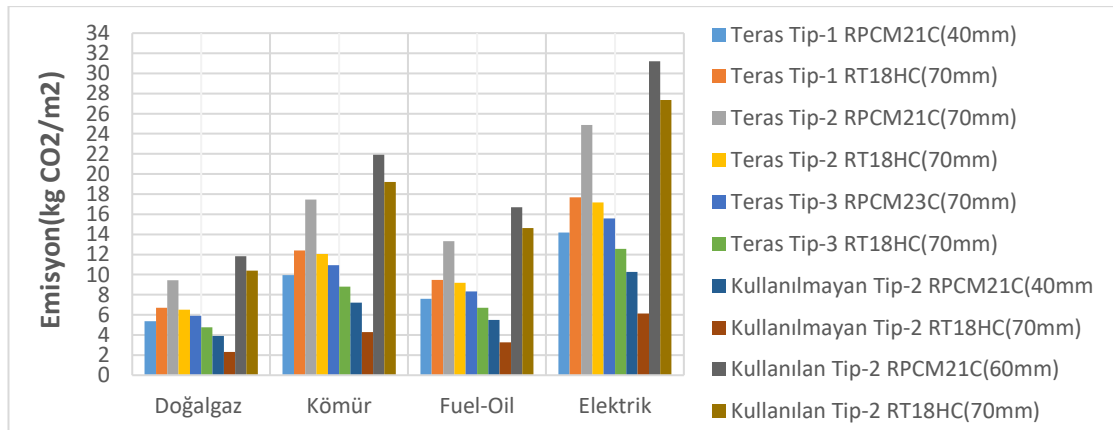
Yapılan çalışma teras çatılı bina modelinde doğalgaz, kömür, fuel-oil ve elektrikte en iyi CO₂ emisyon azalımı miktarını sağlayan teras çatılı Tip-2 RPCM21C(70 mm) bina modelinde görülmektedir. Kullanılmayan çatı aralı Tip-2 bina modelindeki RPCM21C(40 mm) kombinasyonunda en iyi CO₂ emisyon azalımı olduğu anlaşılmaktadır. Kullanılan çatı aralı Tip-2 bina modelindeki RPCM21C(60 mm) kombinasyonunda en iyi CO₂ emisyon azalımı olduğu tespit edilmiştir. Tüm bina modelleri içerisinde tiplere bakıldığında yakıtların kendi içerisinde değerlendirildiğinde doğalgazlı yakıtın yıllık 4804.13 kg CO₂ emisyon azalımı miktarı sağlamıştır. Kömür

yakıtın yıllık 8889.70 kg CO₂ emisyon azalımı miktarı görülmüştür. Fuel-oil yakıtın yıllık 6775.06 kg CO₂ emisyon azalımı miktarı bulunmuştur. Elektrikli yakıtın yıllık 12667.31 kg CO₂ emisyon azalımı miktarı anlaşılmaktadır.

Tüm yakıt tiplerinde kullanılan çatı aralı Tip-2 bina modelindeki RPCM21C(60mm) kombinasyonunda en yüksek emisyon azalımı miktarı sağladığı Tablo 35’de tespit edilmiştir. Tablo 36 ve Şekil 77’ye bakıldığında FDM’li çatı alanına (m²) düşen bina modelleri içerisinde kullanılan çatı aralı Tip-2 bina modelindeki RPCM21C(60 mm) kombinasyonunda en yüksek CO₂ emisyon azalımı miktarı bulunmuştur.

Tablo 36. Çatı ve yakıt tiplerine göre çatı entegre FDM’nin sağlayacağı çatı m² düşen yıllık CO₂ emisyon azalım miktarları(kg CO₂/m²)

		FDM’li Çatı	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	Elektrik
Teras Çatılı Bina Modeli	1-d.i.T	RPCM21C(40 mm)	5.38	9.96	7.59	14.19
		RT18HC(70 mm)	6.70	12.41	9.46	17.68
	2-d.i.T	RPCM21C(70 mm)	9.44	17.46	13.31	24.88
		RT18HC(70 mm)	6.52	12.06	9.19	17.18
	3-d.i.T	RPCM23C(70 mm)	5,91	10.94	8.34	15.59
		RT18HC(70 mm)	4.76	8.81	6.71	12.55
Kullanılmayan Çatı Aralı Bina Modeli	2-d.i.T	RPCM21C(40 mm)	3.89	7.20	5.49	10.26
		RT18HC(70 mm)	2.32	4.30	3.28	6.13
Kullanılan Çatı Aralı Bina Modeli	2-d.i.T	RPCM21C(60 mm)	11.83	21.90	16,69	31,20
		RT18HC(70 mm)	10.38	19.20	14,63	27.36



Şekil 77. Bina modellerindeki en verimli FDM’li modellerin yıllık FDM’li çatı alanına(m²) düşen kg CO₂ emisyon azaltımı

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Ülkemiz enerji korunumu ve enerji arz-talep noktasında gerekli olan enerji kaynaklarına ulaşma noktasında dar rezervlere sahip olduğundan yenilebilir enerji kaynaklara daha çok ihtiyaç olduğu düşünülmüştür. Yenilebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisini FDM'lerle termal enerji kaynağına dönüştürerek elde edilen enerjiyi ihtiyaç yerinde kullanmanın hem toplam enerji kazancı olarak hem de atmosfere bırakılacak CO₂ salınım azalımı etkisi olan konular incelenmiştir. Yapılan çalışma, ülkemizdeki enerjinin büyük payı konutlarda olmasıyla konutların yer aldığı bina modelleri oluşturulmuştur.

DesignBuilder modelleme programında 3 farklı bina modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan bina modelleri teras çatılı, kullanılmayan çatı aralı ve kullanılan çatı aralı modellerden oluşmaktadır. Konut sayısının çok olmasıyla enerji ihtiyacının daha çok talep edileceği yaklaşık 15 milyon nüfusu ile Türkiye'nin en büyük kenti olarak bilinen mega kent İstanbul ili değerlendirilmiştir. Csa iklim sınıfında değerlendirilen İstanbul ili için 2024 yılına ait iklim değerlerine göre EnergyPlus simülasyon programıyla simüle edilmiştir. Bina modelleri zemin kat, 4 normal kat ve çatı olmak üzere 5 katlı konut binası olarak modellenmiştir

Tez çalışmasında güneş açısına doğrudan maruz kalan çatı alanı dikkate alınmıştır. Güneş enerjisini termal enerjiye çevirecek olacak faz değiştiren malzemeleri çatı katmanında kullanılmıştır. Binanın ihtiyaç duyabileceği ısıtma ve soğutma enerji ihtiyacı değerlendirmek için diğer dış kabuk bileşenleri aynı kalmak şartıyla çatı katmanları oluşturulmuştur. Oluşturulan çatı katmanlarına FDM eklenerek bina modellerin yıllık aylık saatlik enerji kazançları ve CO₂ emisyon azalım miktarı incelenmiştir.

Teras çatılı bina modelindeki RT25HC (10 mm) kombinasyon ile oluşturulan 5 farklı modelleri için en verimli olarak Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 teras çatılı modelleri tespit edilmiştir. Kullanılmayan çatı aralı bina modelinde 5 farklı modeller için en verimli olarak tespit edilen kullanılmayan çatı aralı Tip-2 bina modeline indirgenmiştir. Kullanılan çatı aralı bina modelinde ise 5 farklı modeller içinde kullanılan çatı aralı Tip-2 bina modeline bakılmıştır. Belirlenen bina modelleri RT18HC, RT21HC, RT24HC, RT25HC, RT28HC, RPCM18HC, RPCM21C, RPCM23C, RPCM25C ve RPCM29C kombinasyonları kendi içerisinde 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm ve 70 mm kalınlıklarına bakılarak her bir model için 70 farklı analiz yapılmıştır. Teras çatılı bina modeli için toplamda 210 farklı analiz, kullanılmayan çatı aralı bina modelinde 70

farklı analiz, kullanılan çatı aralı bina modelinde 70 farklı analiz ve tez kapsamında toplamda 350 farklı analiz bulunmuştur. Teras çatılı bina, kullanılmayan çatı aralı ve kullanılan çatı aralı modelinde yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyacı olarak 2 farklı sezon belirlenmiştir. Belirlenen sezonların yıllık, aylık ve saatlik analizlerine bakılmıştır.

Çatı tiplerine ait yıllık bazda ve ısıtma, soğutma sezonunda en verimli kombinasyonlar ve tasarruf oranları aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Teras çatılı bina modeli için;

Tip 1 RT18HC (70 mm) Yıllık ısıtma enerjisi % 16.46 enerji kazancı

Tip 2 RPCM21C (70 mm) Yıllık soğutma enerjisi % 14.517 enerji kazancı

Kullanılmayan çatı aralı bina modeli için;

Tip 2 RT18HC (70 mm) Yıllık ısıtma enerjisi % 6.887 enerji kazancı

Tip 2 RPCM21C(40 mm) Yıllık soğutma enerjisi % 9.432 enerji kazancı

Kullanılan çatı aralı bina modeli için;

Tip 2 RT18HC (70 mm) Yıllık ısıtma enerjisi % 23.099 enerji kazancı

Tip 2 RPCM21C (60 mm) Yıllık soğutma enerjisi % 18.640 enerji kazancı

Teras çatılı bina modeli için;

Tip 1 RT18HC (70 mm) Isıtma sezonu % 22.29 enerji kazancı

Tip 2 RPCM21C (70 mm) Soğutma sezonu % 11.59 enerji kazancı

Kullanılmayan çatı aralı bina modeli için;

Tip 2 RT18HC (70 mm) Isıtma sezonu % 12.77 enerji kazancı

Tip 2 RPCM21C(40 mm) Soğutma sezonu % 6.61 enerji kazancı

Kullanılan çatı aralı bina modeli için;

Tip 2 RT18HC (70 mm) Isıtma sezonu % 31.80 enerji kazancı

Tip 2 RPCM21C(60 mm) Soğutma sezonu % 17.41 enerji kazancı

Tez aşamasında yapılan 3 modelin her bir tip için yapılan aylık analizler için soğutma sezondaki aylara göre Haziran ayı, ısıtma sezondaki aylara göre Nisan ayı daha verimli geçtiği görülmektedir. Bina modellerindeki tüm tipler için ısıtma sezonu 08.12.2024 tarihli ve soğutma sezonu 06.07.2024 tarihli günlerde yapılan çalışmalarda iç ortam sıcaklığı konforlu şartlara yaklaşmıştır.

Çatılarda kullanılan FDM'lerin tahmini memnuniyetsizlik indeks(PPD) analizleri yapılmıştır. DesignBuilder modelleme ve EnergyPlus simülasyon programlarıyla 08.12.2024 ve 06.07.2024 tarihli İstanbul ili Csa iklim sınıfında belirlenen verimli bina modellerin analizleri yapılmıştır. Yapılan analizlere göre 08.12.2024 tarihli gün içerisinde

teras çatılı Tip-3 bina modelindeki RT18HC (70 mm) kombinasyonun saat 02:00 zaman diliminde % 54.42 PPD indeks kazanç oranıyla en yüksek seviyeye çıkmıştır. 06.07.2024 tarihli gün içerisinde kullanılan çatı aralı bina modelindeki Tip-2 RPCM21C (60 mm) kombinasyonun saat 13:00 zaman diliminde % 72.22 PPD indeks kazanç oranıyla en yüksek oranını yakalamıştır.

Yapılan CO₂ emisyon azalımı miktarı incelemelerinde kullanılan çatı aralı Tip-2 bina modelindeki RPCM21C(60 mm) kombinasyonun toplam enerji ihtiyacı tasarrufu sonucunda elektrikli yakıt tipi ile yıllık 12667.31 kg CO₂ emisyon azalım kazancı sağlanmıştır. Kullanan çatı aralı Tip-2 bina modelindeki RPCM21C(60 mm) kombinasyonun çatı alanındaki m² düşen yıllık 31.20 kg CO₂ emisyon kazancı oluşmuştur. Oluşan emisyon azalım kazancı diğer yakıt tiplerinde ve modellerdeki emisyon azalım kazancına göre kullanan çatı aralı Tip-2 RPCM21C(60 mm) kombinasyonu en kazançlı durumu görülmüştür.

Yapılan tüm bu incelemeler, analizler, çalışmalar ve simülasyonlar sonucunda;

1-Csa iklim şartlarında farklı FDM'lerin farklı ısı karakteristlik özellikleri sergilediği anlaşılmaktadır.

2-FDM'lerin kalınlık artmasıyla ısı enerji ihtiyaç tasarrufu artacağı anlamına gelmediği, aksine kalınlığın artması belirli bir kalınlık eşliğinden sonra olumsuz sonuçlar oluşturulacağı görülmüştür.

3-Csa iklim sınıfında ideal erime sıcaklığını yakalanması gerektiği önerilmektedir. Ayrıca FDM'lerin ısıtma ve soğutma sezonu olarak farklı performanslar sergilediği tespit edilmiştir.

4-İstanbul gibi Csa iklim sınıfındaki 18°C-23°C erime sıcaklıklarında FDM'lerin enerji kazancı anlamında diğer erime sıcaklıklara göre daha kazançlı olduğu düşünülmektedir.

5- RT18HC, RT21HC, RT24HC, RT25HC ve RT28HC malzemeler ısıtma sezonunda daha verimli olurken, RPCM18HC, RPCM21C, RPCM23C, RPCM25C ve RPCM29C faz değiştiren malzemeler soğutma sezonunda daha verimli olmuşlardır.

KAYNAKÇA

- Al-Shannaq, R., Kurdi, J., Al-Muhtaseb, S., Dickinson, M., ve Farid, M. (2015). Supercooling elimination of phase change materials (PCMs) microcapsules. *Energy*, 87, 654-662. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.033>
- Anayurt, M. (2021). *Duvar ve çatı elemanlarında faz değıştiren malzeme kullanımına dayalı ısı performansın farklı iklim koşullarına bağlı olarak değerdendirilmesi*. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Arumugam, C. ve Shaik, S. (2021). Air-conditioning cost saving and CO2 emission reduction prospective of buildings designed with PCM integrated blocks and roofs. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 48, 101657. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101657>
- Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., de' Rossi, F., ve Vanoli, G. P. (2014). Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials: Energy savings and indoor comfort in the cooling season. *Applied Energy*, 113, 990-1007. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.045>
- ASHRAE. (2004). *ASHRAE Standard 55: Thermal environmental conditions for human occupancy*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE. (2013). *ASHRAE Standard 55: Thermal environmental conditions for human occupancy*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE. (2017). *ASHRAE handbook: Fundamentals*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Bayram, N. C. (2021). *Faz değıştiren malzeme destekli iç sıva uygulamalarının deneysel incelenmesi: Pamuk lifli sıva örneğı*. Doktora tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Boobalakrishnan, P., Manoj Kumar, P., Balaji, G., Jenaris, D., Kaarthik, S., Babu, M., ve Karthhik, K. (2021). Thermal management of metal roof building using phase change material (PCM). *Materials Today: Proceedings*, 47, 5964-5968. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.012>
- Cabeza, L. F., Castell, A., Barreneche, C., de Gracia, A., ve Fernández, A. I. (2011). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review.

- Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1675-1695.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.018>
- Casini, M. (2016). Phase-change materials. M. Casini (Ed.), *Smart Buildings: Advanced Materials and Nanotechnology to Improve Energy Efficiency and Environmental Performance* içinde (s. 179–218). Woodhead Publishing.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100635-1.00005-8>
- Coşkun, A. (2018). *Faz değıştiren malzemelerin sıcak-kuru ve soğuk iklim bölgelerindeki yapı kabuğu enerji performansının karşılaştırmalı analizi*. Yüksek lisans tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, İstanbul.
- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., . . . Glazer, J. (2001). EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4), 319-331.
[https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00114-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6)
- Cuce, E., Shaik, S., Roy, A., Arumugam, C., Afzal, Asif., Cuce, P. M., . . . Shaik, S. V. (2024). Thermal analysis of building roofs with latent heat storage for reduction in energy consumption and CO₂ emissions: An experimental and numerical research. *Advances in Civil Engineering*, 2024, 1-15. <https://doi.org/10.1155/2024/6676188>
- DesignBuilder Software Ltd. (2023). *DesignBuilder simulation software user manual*. Gloucestershire, UK.
- Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., ve Kleypas, J. A. (2009). Ocean acidification: The other CO₂ problem. *Annual Review of Marine Science*, 1, 169-192.
<https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834>
- Fanger, P. O. (1970). *Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press.
- Gümüş, C. (2019). *Isıl enerjinin faz değıştiren maddeler kullanılarak depolanması*. Yüksek lisans tezi, Yalova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yalova.
- IEA. (2020). *Energy technology perspectives*. International Energy Agency.
- IEA. (2021). *Buildings sector CO₂ emissions*. International Energy Agency.
- IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press.
- ISO 13790. (2008). *Energy performance of buildings—Calculation of energy use for space heating and cooling*. International Organization for Standardization.

- ISO. (2005). *ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment*. International Organization for Standardization.
- Kenisarin, M. ve Mahkamov, K. (2007). Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), 1913-1965. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.03.011>
- Kharbouch, Y., Ouhsaine, L., Mimet, A., ve El Ganaoui, M. (2018). Thermal performance investigation of a PCM-enhanced wall/roof in northern Morocco. *Building Simulation*, 11, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0449-5>
- Khudhair, A. M. ve Farid, M. M. (2004). A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. *Energy Conversion and Management*, 45(2), 263-275. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00131-6](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00131-6)
- Kim, H., Kim, Y. S., Kwac, L., Park, M., ve Shin, H. K. (2020). Role of phase change materials containing carbonized rice husks on the roof-surface and indoor temperatures for cool roof system application. *Molecules*, 25(14), 3280. <https://doi.org/10.3390/molecules25143280>
- Konuklu, Y. ve Paksoy, H. Ö. (2011). Faz değıştiren maddeler ile binalarda enerji verimliliği. *X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, Türkiye, 13-16 Nisan 2011.
- Lee, K. O. (2014). *Experimental and simulation approaches for optimizing the thermal performance of building enclosures containing phase change materials*, Doktora tezi, University of Kansas, Lawrence, Kansas.
- Mehling, H. ve Cabeza, L. F. (2008). *Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68557-9>
- Mourid, A. ve Alami, M. (2017). Thermal behavior of a building provided with PCM on the roof and exposed to solar radiation. *Journal of Solar Energy Engineering*, 139(6), 061005. <https://doi.org/10.1115/1.4037905>
- Nazir, H., Batool, M., Bolivar Osorio, F. J., Isaza-Ruiz, M., Xu, X., Vignarooban, K., . . . Kannan, A. M. (2019). Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 129, 491-523. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.126>
- NOAA. (2023). *Trends in atmospheric carbon dioxide*. National Oceanic and Atmospheric Administration.

- Öztürk, H. H. (2005). Güneş enerjisinin gizli ısı tekniği ile depolanması. *Güneş Enerjisi Sistemleri Sempozyumu*, Mersin, Türkiye, 24-25 Haziran 2005.
- Prajapati, R., Rathod, M., ve Banerjee, J. (2025). Evaluating thermal performance of PCM-integrated roofs: A numerical study on temperature regulation across different roof types. *Energy Storage*, 7(1), e70199. <https://doi.org/10.1002/est2.70199>
- Rabani, M., Rabani, M., ve Mehrjardi, M. (2025). Experimental assessment of ceiling cooling systems incorporating PCM in flat and domed roofs: Energy, environmental, and economic performance in hot-dry climates. *Energy Reports*, 14, 1020-1035. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.08.009>
- Rathore, P. K. S., Gupta, N. K., Yadav, D., Shukla, S. K., ve Kaul, S. (2022). Thermal performance of the building envelope integrated with phase change material for thermal energy storage: An updated review. *Sustainable Cities and Society*, 79, 103690. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103690>
- Rodriguez-Ubinas, E., Ruiz-Valero, L., Vega, S., ve Neila, J. (2012). Applications of phase change material in highly energy-efficient houses. *Energy and Buildings*, 50, 49–62. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.018>
- Salyer, I. O., Sircar, A. K., Chartoff, R. P., ve Miller, D. E. (1985). Advanced phase change materials for passive solar storage applications. *Proceedings of the 20th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, Warrendale, PA, USA.
- Santamouris, M. (2016). Innovating to zero the building sector in Europe: Minimising the energy consumption, eradication of the energy poverty and mitigating the local climate change. *Solar Energy*, 128, 61-94. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.01.021>
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., ve Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318-345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
- Shi, Z., Ren, J., Zhang, T., ve Shen, Y. (2024). The effects of thickness and location of PCM on the building's passive temperature-control—a numerical study. *Energy Engineering*, 121(3), 681-702. <https://doi.org/10.32604/ee.2023.045238>
- Simon, F., Ruiz Valero, L., Girard, A., ve Galleguillos, H. (2023). Experimental and numerical analysis of a PCM-integrated roof for higher thermal performance of buildings. *Journal of Thermal Science*, 33, 522-536. <https://doi.org/10.1007/s11630-023-1909-5>

- Taheri, H. ve Sharma, A. (2015). An overview of phase change materials for building applications. *Green Energy and Technology*, 201, 189-213. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2337-5_8
- Terhan, M. ve 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, 130601. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130601>
- Tunçbilek, E., Wang, Di., Arıcı, M., Krajcik, M., Nižetić, S., ve Li, D. (2025). Energy conservation and CO2 mitigation potential through PCM integration in building envelopes: Effect of façade orientation. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 150, 1120-1135. <https://doi.org/10.1007/s10973-025-14168-x>
- Tyagi, V. V. ve Buddhi, D. (2007). PCM thermal storage in buildings: A state of art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(6), 1146-1166. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.10.002>
- U.S. Department of Energy. (2021). *EnergyPlus engineering reference*. Washington, D.C.
- URL-1. (2017). *ETCC Easton Archery Center report*. <https://phasechange.com/wp-content/uploads/2020/08/ETCC-Easton-Archery-Center-report-Nov-2017.pdf> (Erişim Tarihi: 01 Ocak 2026).
- Ürge-Vorsatz, D., Cabeza, L. F., Serrano, S., Barreneche, C., ve Petrichenko, K. (2015). Heating and cooling energy trends and drivers in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 85-98. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.039>
- WHO. (2018). *Climate change and health*. World Health Organization.
- Yang, Y., Kim, T., Chung, M., ve Park, J. (2019). PCM cool roof systems for mitigating urban heat island- an experimental and numerical analysis. *Energy and Buildings*, 205, 109537. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109537>
- Yılmazoğlu, M. Z. (2010). Isı enerjisi depolama yöntemleri ve binalarda uygulanması. *Journal of Polytechnic*, 13(1), 33-42.
- Yousefi, A., Tang, W., ve Alghamdi, S. (2023). Computer simulation for energy-efficient buildings integrated with developed phase change material (PCM). *Key Engineering Materials*, 951, 161-165. <https://doi.org/10.4028/p-Kh9DaL>

- Yu, J., Leng, K., Wang, F., Ye, H., ve Luo, Y. (2020). Simulation study on dynamic thermal performance of a new ventilated roof with form-stable PCM in southern China. *Sustainability*, 12(22), 9315. <https://doi.org/10.3390/su12229315>
- Zalba, B., Marin, J. M., Cabeza, L. F., ve Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251-283. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8)
- Zhou, D., Zhao, C. Y., ve Tian, Y. (2012). Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 92, 593-605. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.025>

ÖZGEÇMİŞ

Yusuf MOLLAHÜSEYİNOĞLU, ilk, orta ve lise öğrenimini Trabzon'da tamamladı. 2007 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünde öğrenim hayatına devam ederek, 2011 yılında Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2023 yılında Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında yüksek Lisans Programına başladı. 2013 yılından 2017 yılına kadar Erzurum Teknik Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı bünyesinde Makine Mühendisi unvanıyla idari personel olarak çalışmıştır. 2017 yılından Erzurum Teknik Üniversitesi kurumundan Trabzon Büyükşehir Belediyesi kurumuna naklen geçiş yaparak Trabzon Büyükşehir Belediyesi Fen İşleri Dairesi Başkanlığında Mühendis olarak çalışmalarına devam etmektedir.