

**FAZ DEĞİŞTİREN MADDE İÇEREN
BİNA GÜNEY DUVARININ
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Aslıhan KURNUÇ ÇIRAKMAN

**DOKTORA TEZİ
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Doç. Dr. Yusuf Ali KARA
2010
Her hakkı saklıdır**

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

FAZ DEĞİŞTİREN MADDE İÇEREN BİNA GÜNEY DUVARININ
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Aslıhan KURNUÇ ÇIRAKMAN

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ERZURUM
2010

Her hakkı saklıdır

Doç. Dr. Yusuf Ali KARA'nın danışmanlığında, Aslıhan KURNUÇ ÇIRAKMAN tarafından hazırlanan bu çalışma **19.04.2010** tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Doç. Dr. Yusuf Ali KARA

İmza : 


Üye : Doç. Dr. Cihat ARSLANTÜRK

İmza : 

Üye : Doç. Dr. Kenan YAKUT

İmza : 

Üye : Doç. Dr. İbrahim TÜRKMEN

İmza : 

Üye : Doç. Dr. Bayram ŞAHİN

İmza : 

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof.Dr. Ömer AKBULUT

Enstitü Müdürü

ÖZET

Doktora Tezi

FAZ DEĞİŞTİREN MADDE İÇEREN BİNA GÜNEY DUVARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Aslıhan KURNUÇ ÇIRAKMAN

Atatürk Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Yusuf Ali KARA

Bu çalışmada, güneş enerjisini gizli ısı şeklinde depolayan yeni nesil bir Trombe duvarı tasarlanarak, duvarın yıllık performansı deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla bir deney odası yapılarak, odanın güney duvarı Faz Değiştiren Madde (FDM) içeren Trombe duvarı (veya kısaca FDM duvar) şeklinde tasarlanmıştır. FDM duvarın yapısı, içerden dışarıya doğru, yalıtım, tuğla, FDM katılmış sıva, hava boşluğu ve özel tasarlanmış şeffaf yalıtım ünitesinden oluşmaktadır. Duvarın ısıl ve optik performansını deneysel olarak incelemek için bir yıl boyunca ışınım şiddeti, sıcaklık, dolaşım hava debisi, elektrik tüketimi gibi parametreler ölçülerek bir veri toplama sistemi vasıtasıyla kaydedilmiştir. Deneysel verilerin analizi sonucunda, faz değişim maddesi için uygun ergime sıcaklığı belirlenmiş, duvardan sağlanan faydalı ısıl enerjinin odanın ısıtma yükünü karşılama oranı, duvarın genel verimi, şeffaf yalıtım malzemesinin optik verimi gibi performans parametrelerinin günlük ve aylık değişimi analiz edilmiştir.

FDM duvarın sağladığı faydalı enerjinin, duvarın arkasında yer alan test odasının ısıtma ihtiyacını karşılama oranı 2008 yılının Ekim, Kasım, Aralık aylarında sırasıyla %70,4, %40,8 ve %14,2, 2009 yılının Ocak, Şubat ve Mart aylarında sırasıyla %9,4, %11,3, %4,3 olarak belirlenmiştir. GR35 FDM içeren duvarın genel verimi, GR41 FDM içeren duvarın genel veriminden daha büyük olmuştur. Buradan, faz değişim sıcaklığı arttıkça genel verimin düştüğü sonucuna varılmıştır. Şeffaf yalıtım ünitesinin ışınım geçirme oranının kış aylarında 0,45-0,55 aralığında, yaz aylarında ise 0,18-0,20 aralığında değiştiği tespit edilmiştir.

2010, 188 sayfa

Anahtar Kelimeler: Faz değiştiren madde içeren yapı malzemeleri, pasif güneş ısıtma sistemleri, faz değiştiren Trombe duvar, şeffaf yalıtım malzemeleri

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE SOUTH WALL OF THE BUILDING INTEGRATED WITH PHASE CHANGE MATERIAL

Aslıhan KURNUÇ ÇIRAKMAN

Atatürk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Yusuf Ali KARA

This study, the annual performance of a new generation Trombe wall in which solar energy is stored as latent heat is experimentally investigated. For this purpose, a test room is built and the south wall of a test room is designed as Trombe wall having Phase Change Material (i.e., PCM wall). The PCM wall made of, from inside to outside, insulation, brick, plaster in which encapsulated PCM is buried, air gap and novel designed Transparent Insulation Material (TIM). Data such as solar radiation, temperature, flow rate of circulation air, electric consumption are measured and recorded via data acquisition system to analyses the thermal and optical performance of the PCM wall. After analyzing the experimental data, proper melting temperature for the PCM is determined, the diurnal, monthly and annual variation of the performance parameters such as, the ratio of the solar energy benefit to heat load of the room, overall efficiency of the wall, solar transmittance of the TIM are analyzed.

The ratio of energy benefit of PCM wall to heat load of test room is determined as 70,4%, 40,8%, and 14,2% for October, November and December of the year 2008, respectively and 9,4%, 11,3% and 4,3% for January, February and March of the year 2009, respectively. The overall efficiency of the GR35 PCM wall is higher than that of GR41 PCM wall. It is concluded that higher melting temperature of PCM results in lower overall efficiency. It is determined that solar transmittance of TIM varies between 0,45 to 0,55 in the winter season and 0,18 to 0,2 in summer season.

2010, 188 pages

Keywords: Incorporating PCMs into building materials, passive solar heating, PCM trombe wall, Transparent Insulation Materials (TIMs)

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerekleŐtirilmesinde, baŐlangıcından sonuna kadar gerekli bütün yardım, tavsiye ve yönlendirmeleri yapan, karŐılaŐtıđım problemlerin özümünde deneyimlerinden yararlandığım, zor zamanlarımda beni motive eden tez danıŐmanım ve hocam Sayın Doç. Dr. Yusuf Ali KARA'ya en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Bu çalışmanın gerçekleŐmesinde gerekli finansmanı sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'a, TÜBİTAK Mühendislik Araştırma Grubuna, Atatürk üniversitesine ve ilgili çalıŐanlarına teşekkür ederim.

Aslıhan KURNUÇ ÇIRAKMAN

Nisan 2010

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bilgiler.....	5
1.2. Motivasyon	7
2. KURAMSAL TEMELLER	9
2.1. Termal Enerji Depolama.....	9
2.1.1. Duyulur ısı	12
2.1.2. Gizli Isı	12
2.1.3. Reaksiyon ısısı	13
2.2. Faz Değiştiren Maddelerin Sınıflandırılması.....	14
2.3. Faz Değiştiren Maddeler ve Isı Depolamada Uygulama Alanları.....	17
3. MATERYAL ve YÖNTEM	19
3.1. Deney Odası ve FDM Trombe Duvarının İnşası	19
3.2. Kapsüllenmiş Faz Değişim Maddeleri	23
3.3. FDM İçeren Sıva Levhaları (Sıvapan).....	26
3.4. Ölçme Sensörleri	28
3.5. Şeffaf Yalıtım Ünitesi.....	29
3.6. Sistemin Çalışması ve Otomasyon	29
3.7. Deneysel Yöntem.....	32
3.8. Matematik Model.....	33
3.9. Veri Analizi	35
3.10. Belirsizlik Analizi	35
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	36
4.1. Günlük Analiz.....	36

4.2. Aylık Analiz.....	45
4.3. Yıllık Analiz	51
4.3.1. Isıtma periyodu	51
4.3.2. Yaz sezonu.....	58
4.4. Optik Analiz.....	62
4.5. FDM İçeren Sıva Levhaları (FDM Sıvapan) İle İlgili Analizler	68
4.5.1. DSC analiz.....	68
4.5.2. FDM sıvapanların hazırlanışı	72
4.5.3. Sıvapanların termofiziksel özellikleri.....	73
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	75
5.1. Sonuçlar	75
5.2. Öneriler	79
KAYNAKLAR	80
EKLER.....	83
EK 1	83
ÖZGEÇMİŞ	188

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A	ŞYÜ alanı (m^2)
A_c	Kanalın kesit alanı (m^2)
c_p	Özgül ısı ($J/kg\cdot K$)
g	Işınım geçirme oranı
$I_{gç}$	ŞYÜ'den geçen ışınım şiddeti (W/m^2)
I_{gl}	ŞYÜ dış yüzeyine gelen anlık ışınımı (W/m^2)
Q_{el}	Elektrik enerjisi (J)
Q_f	Odaya aktarılan günlük faydalı enerji (J/gün)
$Q_{gç}$	ŞYÜ dış yüzeyine günlük geçen güneş ışınım enerjisi (J/gün)
Q_{gl}	ŞYÜ dış yüzeyine günlük gelen güneş ışınım enerjisi (J/gün)
$T_{am}(t)$	Herhangi bir anda sirkülasyon havasının alt menfezdeki sıcaklığı($^{\circ}C$)
$T_{üm}(t)$	Herhangi bir anda sirkülasyon havasının üst menfezdeki sıcaklığı($^{\circ}C$)
V	Kanaldaki hava hızı (m/s)
\dot{m}	Duvar hava boşluğundan geçen havanın kütleli debisi (kg/s)
η_g	Duvarın günlük genel verimi
$\dot{Q}_f(t)$	Odaya aktarılan faydalı ısı gücü (W)
ρ	Havanın Yoğunluğu (kg/m^3)

Kısaltmalar

DSC	Diferansiyel taramalı kalorimetre
FDM	Faz değişim maddesi
GR35	Rubitherm Granulate GR35
GR41	Rubitherm Granulate GR41
IYKO	Isıtma yükü karşılama oranı
ŞYÜ	Şeffaf yalıtım ünitesi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Faz değiştiren güneş duvarı.	2
Şekil 1.2. Faz değiştiren güneş duvarı ve aydınlatma elemanı.	3
Şekil 1.3. Faz değiştiren Trombe duvarı	4
Şekil 1.4. Klasik Trombe duvarı.	6
Şekil 1.5. Bu alışma için tasarlanan FDM Trombe duvarı.	8
Şekil 2.1. Güneş enerjisinin termal depolanmasının farklı tipleri.	10
Şekil 2.2. Bir TED sisteminin genel bileşenleri.	11
Şekil 2.3. Faz değiştiren maddelerin sınıflandırılması.	14
Şekil 2.4. FDM uygulamaları.	18
Şekil 3.1. Deney odasının ilk hali.	19
Şekil 3.2. Deney odasının tadilattan sonraki hali.	20
Şekil 3.3. Güney duvarın yapılışı.	20
Şekil 3.4. Çatının tamamlanışı.	20
Şekil 3.5. Yalıtım.	21
Şekil 3.6. Boya.	21
Şekil 3.7. FDM içeren sıva levhalarının duvara montajı.	21
Şekil 3.8. Menfezler, hava kanalı, fan.	22
Şekil 3.9. Digital termostatlar, data logger.	22
Şekil 3.10. Yağlı radyatör, kumanda panosu ve elektrik sayacı.	23
Şekil 3.11. ŞYÜ'nin montajı ve deney odasının son hali.	23
Şekil 3.12. Mikrokapsüllenmiş FDM (toz).	24
Şekil 3.13. Makrokapsüllenmiş FDM(granüler).	24
Şekil 3.14. Rubitherm granulate (makro kapsüllenmiş FDM).	25
Şekil 3.15. FDM katılmış sıva harcı.	26
Şekil 3.16. FDM içeren sıva levhaları.	26
Şekil 3.17. FDM içeren sıva levhaları boyanıyor.	26
Şekil 3.18. Deney numuneleri.	27
Şekil 3.19. Deney numuneleri.	27
Şekil 3.20. Sensörlerin yerleşimi.	30

Şekil 3.21. Faz değiştiren trombe duvarın çalışma prensibi	31
Şekil 3.22. Yazılım ekranı.....	32
Şekil 4.1. Açık bir güne ait piranometre grafiği.....	36
Şekil 4.2. Kapalı bir güne ait piranometre grafiği.....	37
Şekil 4.3. Yarı açık bir güne ait piranometre grafiği.....	37
Şekil 4.4. Açık bir güne ait ışınım geçirme oranı grafiği.....	38
Şekil 4.5. Açık bir güne ait sıvapan ve camın ısı akısı grafiği.....	38
Şekil 4.6. Açık bir güne ait ŐY yüzey sıcaklıkları grafiği.....	39
Şekil 4.7. Açık bir güne ait sıvapan sıcaklıkları grafiği	40
Şekil 4.8. GR35 bölmesi yüzey sıcaklıkları ve kanal hava hızı grafiği	40
Şekil 4.9. GR41 bölmesi yüzey sıcaklıkları ve kanal hava hızı grafiği	41
Şekil 4.10. GR35 st-alt menfez hava sıcaklıkları ve kanal hava hızı grafiği	42
Şekil 4.11. GR41 st-alt menfezlerdeki hava sıcaklıkları ve kanal hava hızı grafiği	42
Şekil 4.12. GR35 ve GR41 Faydalı ısı grafiği	43
Şekil 4.13. 10.01.2009 tarihine ait günlük enerji değerleri grafiği	44
Şekil 4.14. Ocak 2009 aylık toplam enerji grafiği	46
Şekil 4.15. Ocak 2009'a ait aylık ısıtma yükü karşılama oranı ve genel verim grafiği	46
Şekil 4.16. Kasım 2008'e ait günlük enerji değerleri grafiği.....	47
Şekil 4.17. Kasım 2008'in tam açık günleri için genel verim grafiği	48
Şekil 4.18. Kasım 2008'in kapalı günleri hariç genel verim grafiği	49
Şekil 4.19. GR35 bölmesi yüzey sıcaklıkları ve kanal hava hızı grafiği	50
Şekil 4.20. GR41 bölmesi yüzey sıcaklıkları ve kanal hava hızı grafiği	50
Şekil 4.21. Aylara göre enerji grafiği.....	52
Şekil 4.22. Isıtma sezonunda aylara göre ısıtma yükü karşılama oranı ve genel verim grafiği.....	55
Şekil 4.23. Isıtma sezonu boyunca her ay için temsili açık günlerdeki günlük genel verim grafiği.....	56
Şekil 4.24. Yıl boyunca her ay için temsili açık günlerdeki anlık ışınım geçirme oranı grafiği	57
Şekil 4.25. Aylara göre faydalı enerji grafiği.....	59
Şekil 4.26. Yaz sıcak bir günde GR41 bölmesindeki sıcaklıklar grafiği	59

Şekil 4.27. Yaz sıcak bir günde GR35 bölmesindeki sıcaklıklar grafiği	60
Şekil 4.28. Dış hava sıcaklığı grafiği	61
Şekil 4.29. 19 Ocak 2009'a ait değerler	62
Şekil 4.30. 19 Ocak 2009 gününe ait piranometre grafiği	63
Şekil 4.31. 24 Ağustos 2009 gününe ait piranometre grafiği.....	64
Şekil 4.32. Seçilmiş bir yaz ve bir kış gününe ait GR35 ışınım geçirme oranı grafiği	64
Şekil 4.33. 2009 Ağustos ayına ait tam açık günler için anlık ışınım geçirme oranı grafiği	65
Şekil 4.34. Yıl boyunca kapalı günler hariç günlük ışınım geçirme oranı grafiği	67
Şekil 4.35. Kapsüllenmiş FDM GR35 için özgül ısı-sıcaklık grafiği	70
Şekil 4.36. Kapsüllenmiş FDM GR35 için Isı füzyon eğrisi	70
Şekil 4.37. Kapsüllenmiş FDM GR41 için özgül ısı eğrisi.....	71
Şekil 4.38. Kapsüllenmiş FDM GR41 için ısı füzyon eğrisi	71

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Isı Depolama İçin Organik ve İnorganik Maddelerin Kıyaslanması	16
Çizelge 4.1. Günlerin durumu	53
Çizelge 4.2. GR35 ve GR41 için üretici katalog değerleri	69
Çizelge 4.3. Harçların karışım oranları	72
Çizelge 4.4. Üretilen harçların bazı ısıl ve mekanik özellikleri	74

1. GİRİŞ

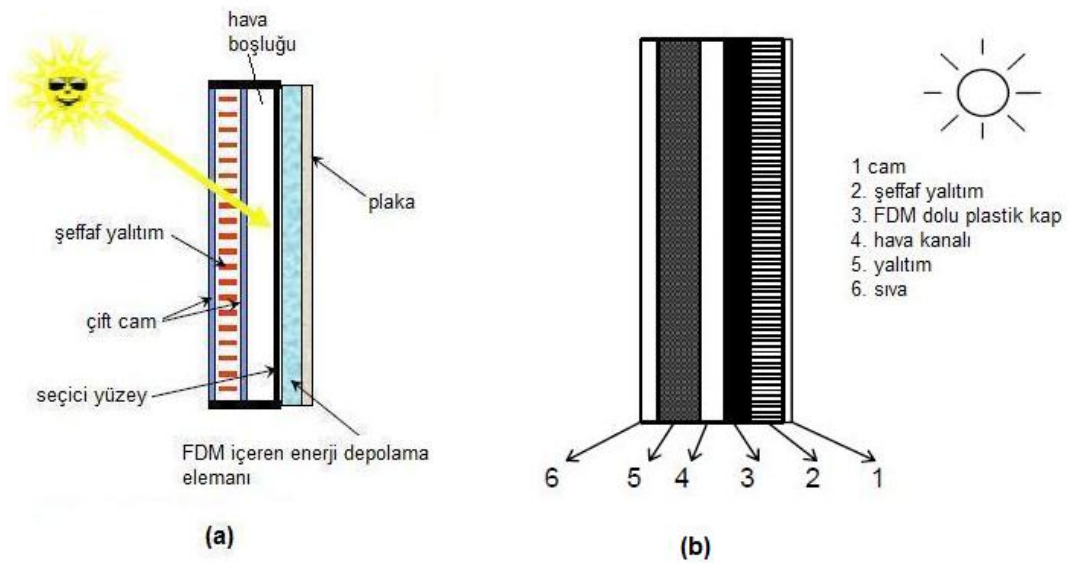
Ucuz ve temiz olması nedeniyle bina ısıtmada yeni ve yenilenebilir enerji kullanımı her geçen gün daha büyük önem kazanmaktadır. Isıtma amacıyla güneş enerjisini kullanmak, doğası gereği depolanmasını gerektirir. Isıl enerjinin gizli ısı olarak depolanması göreceli olarak yeni bir çalışma konusudur ve 1970'li yıllardaki enerji kriziyle birlikte, bu konudaki araştırmalar hız kazanmıştır. Güneş enerjisinin yapı malzemelerinde gizli ısı olarak depolanması 1980'li yılların başlarından itibaren alternatif enerji uygulamaları alanında popüler bir araştırma konusu olmaya başlamıştır.

Güneş pasif ısıtma sistemlerinde güneş enerjisi bina gövdesinde duyulur veya gizli ısı şeklinde depolanarak, güneşin olmadığı zamanlarda iç ortamın ısıtılmasında kullanılır. Birim kütle başına enerji depolama kapasitesinin yüksek olması nedeniyle, ısı enerjinin faz değiştiren bir madde içerisinde gizli ısı olarak depolanması yöntemi diğer ısı depolama yöntemlerine göre çok daha caziptir. Kapsüller içerisine hapsedilmiş çeşitli faz değişim maddeleri, yapı elemanları içerisine katılarak, güneş enerjisi yapı elemanı içerisinde gizli ısı şeklinde depolanır. Uygulamanın amacına bağlı olarak alçıpan veya sıva gibi duvar ve tavan kaplama malzemelerine veya döşeme, perde beton gibi çeşitli bina bileşenleri içerisine kapsüllenmiş faz değişim maddesi (FDM) katılabilir.

Bina gövdesi üzerinde gizli ısı şeklinde güneş enerjisi depolama konusunun birçok boyutu söz konusudur. Bunlar; (1) uygun FDM seçimi, (2) FDM'nin kapsüllenmesi, (3) FDM'nin yapı malzemelerine veya bina gövdesine karıştırılması, (4) şeffaf yalıtım malzemeleri ve (5) bina mimarisi şeklinde sıralanabilir. Konunun bütün boyutlarını kapsayan güncel literatür derlemesi aşağıda verilen kaynaklarda bulunabilir. Kenisarin and Mahkamov (2007) ticari ürün olarak piyasada bulunan FDM'lerin sınıflandırılması, termofiziksel özellikleri, stabilitesi ve uygulama alanları hakkında geniş bilgi vermektedirler. Pasupaty *et al.* (2008) bina ısıtma ve soğutma uygulamalarında kullanılan FDM'ler, mikro ve makro kapsülleme yöntemleri, FDM'nin yapı malzemelerine karıştırılması veya emdirilmesi, bina soğutma amacıyla FDM kullanımı

gibi konularda kapsamlı bir literatür derlemesi sunmaktadır. Sharma *et al.* (2009) yaptıkları derlemede termal enerji depolama yöntemleri, gizli ısı depolama malzemelerinin (FDM) sınıflandırılması gibi konularda temel bilgi vermiş, termal enerji depolama sistemlerinin binalarda uygulanması konusunda kapsamlı bir literatür derlemesi sunmuşlardır. Binalarda termal enerji depolama konusunda yürütülen ve sonuçlandırılmış çok sayıda uygulama projelerine dair geniş bilgi ise ECES Annex17 (Hauer *et al.* 2001) adlı kaynakta bulunabilir. Khudhair and Farid (2004) yapı elemanlarına (duvar, tavan, döşeme) FDM katarak bina soğutma veya literatürdeki adıyla “pik yükün ertelenmesi veya tıraşlanması” konusunda güncel bir literatür derlemesi sunmaktadırlar ve son olarak güneş enerjisini gizli ısı şeklinde depolayan Trombe duvarı (Faz değişimli Trombe duvarı) ile beraber kullanılan şeffaf yalıtım malzemeleri konusunda ise Kaushika and Sumathy (2003) geniş bir literatür derlemesi yapmışlardır.

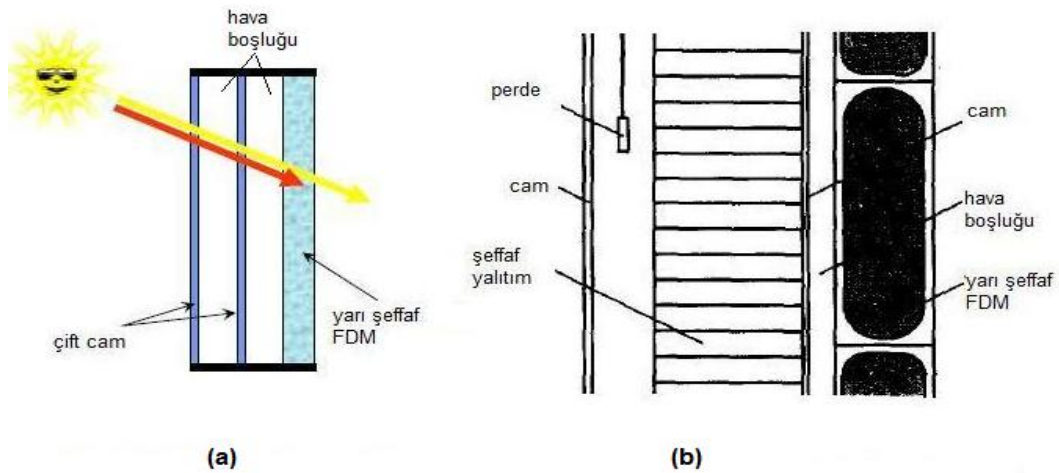
Literatürde FDM içeren Trombe duvarı konusunda yapılan çalışmalar (1) güneş duvarı, (2) faz değiştiren güneş duvarı, (3) faz değiştiren Trombe duvarı, (4) faz değiştiren güneş duvarı ve aydınlatma elemanı, (5) kolektör duvar gibi değişik isimlerle anılmaktadırlar. Şekil 1.1’de değişik iki güneş duvarı görülmektedir.



Şekil 1.1. Faz değiştiren güneş duvarı

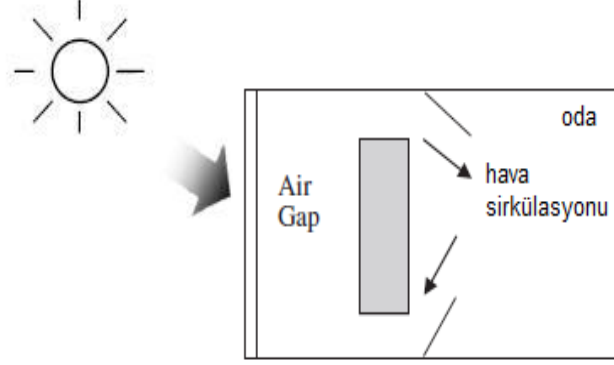
Şekil 1.1(a)'da görülen (ECES Annex17, Hauer *et al.* 2005) duvarın ısı kayıplarını azaltmak için dış tarafta iki cam arasında şeffaf yalıtım malzemesi kullanılmıştır. Seçici yüzey tarafından absorbe edilen güneş ışınımı FDM içerisinde gizli ısı olarak depolanıp ışınım ve doğal taşınım plaka üzerinden iç ortama aktarılır. Stritih and Novak (2002) Şekil 1.1(b)'de görülen güneş duvarını laboratuvar şartlarında güneş simülatörü kullanarak test etmişlerdir. Duvarın ihtiva ettiği siyah parafin wax güneş enerjisini absorbe etmekte ve depolanan ısı, hava kanalından geçirilen iç ortam ventilasyon havasını ısıtmada kullanılmaktadır. Bourdeau (1980) FDM olarak $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (ergime sıcaklığı 29°C) içeren ve toplam kalınlığı 8,1 cm olan güneş duvarını test etmiş ve duvarın ısı performansının 40cm kalınlığında klasik tuğla duvardan daha iyi olduğunu belirlemiştir.

Şekil 1.2(a)'daki güneş duvarı ise güney cephe hem ısıtma hem de aydınlatma yapacak şekilde tasarlanmıştır (Weinlader *et al.* 2005). Dış tarafta çift-cam, arada yalıtım amaçlı hava boşluğu ve iç tarafta ise şeffaf plastik kap içinde yarı şeffaf FDM bulunmaktadır. Kullanılan FDM, gelen ışınımı absorbe ederek faz değiştirirken ışık geçirgenliği de artar. Işık geçirgenliği katı halde iken 0,4 sıvı halde iken 0,9 olarak verilmektedir. Böylece güney cephe hem bir aydınlatma elemanı hem de ısı depolama elemanı olarak görev yapmaktadır. Bu tasarımla güney cepheden olan ısı kaybı ve ısı kazancında sırasıyla %30 ve %50 azalma olduğu belirtilmektedir.



Şekil 1.2. Faz değiştiren güneş duvarı ve aydınlatma elemanı

Şekil 1.2(b)'de ise Manz, *et al.* (1997) tarafından incelenen yine ısıtma ve aydınlatma amaçlı başka bir güneş duvarı tasarımı görülmektedir. Bu duvarın en soğuk aydaki genel veriminin %27 olduğu belirtilmiştir.



Şekil 1.3. Faz değiştiren Trombe duvarı

Farouk and Guceri (1981) faz değiştiren Trombe duvarının (bkz. Şekil 1.3) bina ısıtmada kullanımını deneysel olarak incelemişlerdir. FDM olarak Glauber tuz karışımı ve SUNOCO p-116 wax kullandıkları çalışmalarında, tasarımın doğru yapılması halinde klasik tuğla duvarın dezavantajlarını ortadan kaldıracasını belirtmektedirler.

Swet (1980), Ghoneim *et al.* (1991) ve Chandra *et al.* (1985) FDM olarak $\text{NaCO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ kullandıkları Trombe duvarının klasik Trombe duvarına göre daha ince ve performansının daha yüksek olacağını belirtmektedirler. Knowler (1983) CG parafin wax içerisine metal katkılanarak faz değiştiren Trombe duvarın toplam ısı iletim katsayısını ve ısı verimini artırmayı denemiştir.

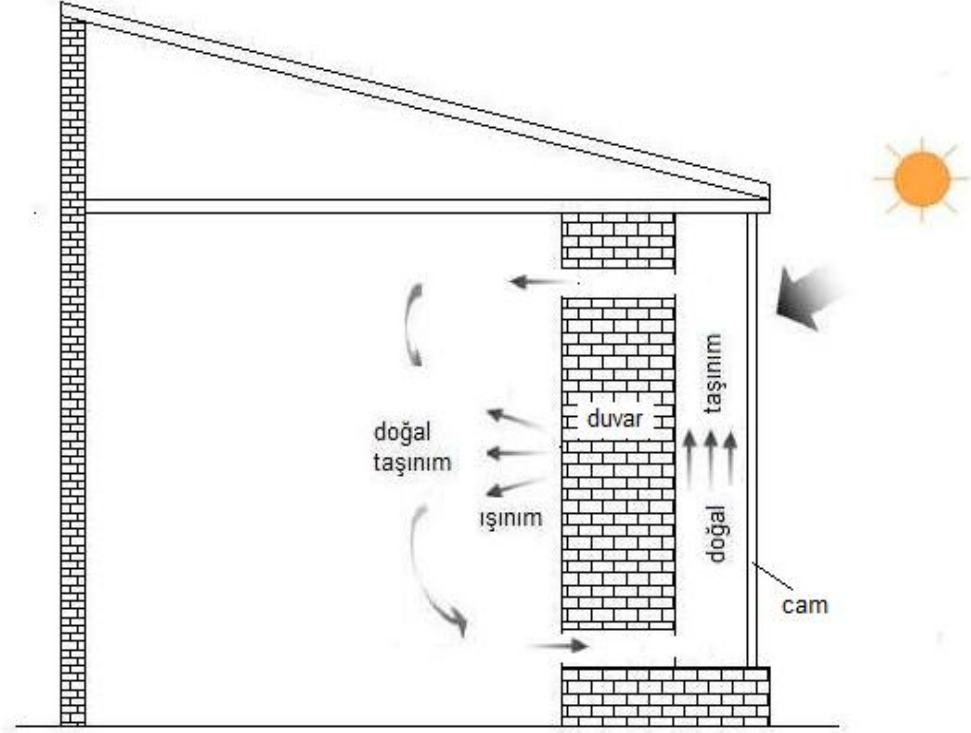
FDM Trombe duvarı cazip bir konsept olmasına rağmen literatürde sınırlı sayıda çalışma mevcuttur (Tyagi and Buddhi 2007). Çalışmaların çoğu ısıtma hakim iklimler için değil soğutma hakim iklimlere yöneliktir dolayısıyla hem temel düşünce hem de konstrüksiyon farklıdır. Bu çalışmasının literatürde var olan çalışmalardan farklılığı

motivasyon bölümünde geniş olarak tartışılmış olmakla beraber, çalışmanın kapsamı aşağıda kısaca maddeler halinde sunulmuştur.

- (1) Duvar içinde kapsüllenmiş FDM (parafin) kullanılmıştır.
- (2) FDM kapsüller yukarıdaki çalışmaların birçoğunda olduğu gibi şeffaf bir kap içerisinde duvara monte edilmemiş aksine yapı malzemesinin (sıva) içerisine doğrudan karıştırılmıştır.
- (3) Duvarın önündeki şeffaf yalıtım ünitesi (ŞYÜ) literatürdekilerden tamamen farklıdır. Kullanılan ŞYÜ'nün ışınım geçirgenliği yazın düşük ve kışın yüksektir.
- (4) Literatürdeki çalışmaların aksine, deneysel inceleme laboratuvar şartlarında değil doğrudan atmosferik şartlarda yapılmıştır. Bu anlamda bu çalışma yerinde birebir uygulamadır.
- (5) Duvarın davranışı 15 aylık bir periyot için incelenmiştir. Böylece duvarın performansının aylara göre nasıl değiştiği, ayrıca ay içerisinde nasıl değiştiği ortaya konulmuştur.
- (6) Araştırmada Erzurum iklim koşulları için uygun bir ergime sıcaklığı belirlenmiştir.
- (7) Kapsüllenmiş FDM'nin yapı malzemesi içerisine hangi oranda katılacağı ve bu oranın sıvanın mekanik özelliklerini nasıl etkileyeceği incelenmiştir.

1.1. Genel Bilgiler

Klasik Trombe duvarı (bkz. Şekil 1.4) binalarda pasif güneş ısıtma yönteminin ilk örneğidir. Klasik Trombe duvarında binanın güney cephesi kalın tuğla duvar olarak yapılır. Duvarın dış yüzeyine, arada yaklaşık olarak 10 cm boşluk olacak şekilde normal pencere camı (tek veya çift cam) veya fiberglas monte edilir. Cam ile duvar arasındaki boşlukta toplanan güneş ışınımı, siyaha boyanmış olan tuğla duvarın dış yüzeyi tarafından absorbe edilir ve duvar kütlesi içinde depolanır. Oda sıcaklığı duvar sıcaklığının altına düştüğü zaman depolanan ısı, ışınım ve taşınım yoluyla belli zaman periyodunda odaya aktarılır. Tuğla duvarla cam arasına geceleri kapatılan bir ısı perdesi yerleştirilmek suretiyle Trombe duvarının ısı kayıpları azaltılabilmektedir.



Şekil 1.4. Klasik Trombe duvarı

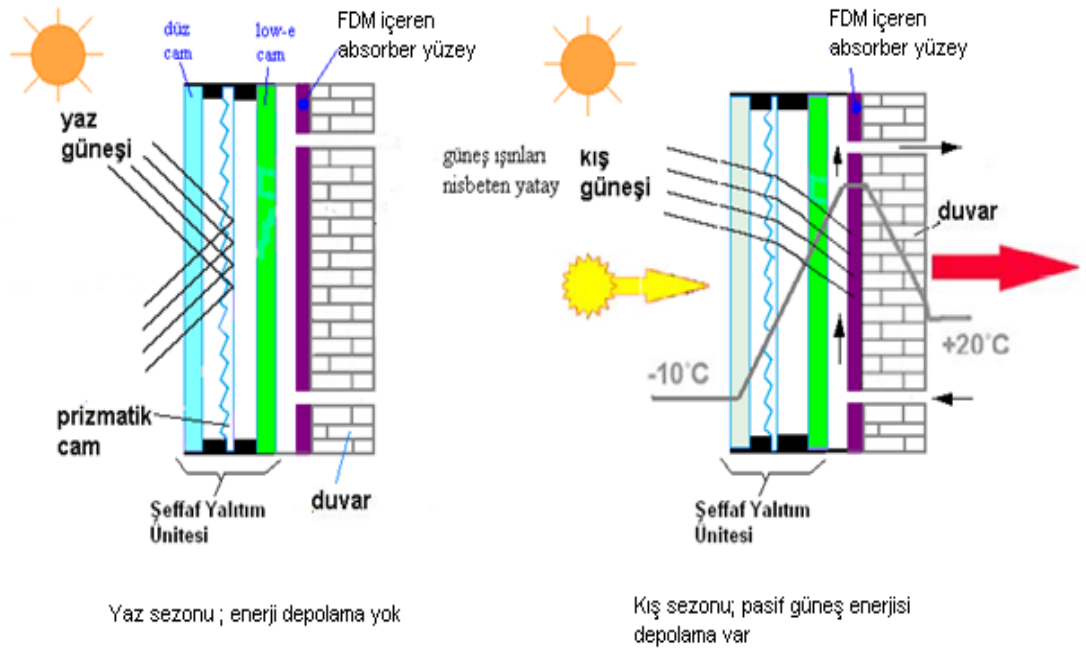
Klasik Trombe duvarında güneş enerjisi duyulur ısı şeklinde depolanır, fakat birim kütle başına ısı depolama kapasitesi çok daha yüksek olması nedeniyle, faz değişim maddesi içeren (FDM) Trombe duvarı (veya sadece FDM duvar) çok daha cazip bir konsepttir (Tyagi and Buddhi 2007). FDM Trombe duvarı veya kısaca güneş duvarı, yapı olarak klasik Trombe duvarıyla benzer bir konstrüksiyona sahiptir. Ararlarındaki yegâne fark, klasik Trombe duvarındaki kalın tuğla duvarın yerini çok daha ince ve içerisi faz değişim maddesi ile doldurulmuş bir yapı elemanının almasıdır. Gün boyu gelen güneş ışınımı FDM'nin ergimesine neden olur ve böylece güneş enerjisi gizli ısı şeklinde FDM içerisinde depolanır. Gece boyunca duvardan ısı çekilerek binaya verilir ve sonuçta FDM yeniden katılaştır (rejenerasyon). Sonuç olarak FDM Trombe duvar, klasik Trombe duvarına göre daha hafiftir, daha az hacim işgal eder ve ısıl sığası daha yüksektir. Faz değiştiren Trombe duvarlarında FDM olarak tuzhidratlar ve hidrokarbonlar kullanılmaktadır.

1.2. Motivasyon

Faz değişim maddesi (FDM) içeren, şeffaf yalıtımlı Trombe duvarı, klasik Trombe duvarı ile yapısal olarak benzer fakat işlevsel olarak çok farklıdır. Yukarıda değinildiği gibi klasik Trombe duvarında (bkz. Şekil 1.4) güneş enerjisi duyulur ısı şeklinde depolandığı için depolanan enerji miktarı duvar sıcaklığı ve kütlesi ile orantılıdır. Ancak duvar sıcaklığı iç ortam konforu ve kış iklim şartları ile sınırlı olduğundan, daha çok enerji depolamak için duvar kütlesinin büyük olması yani duvarın kalın olması gerekir. Klasik Trombe duvarının önünde normal pencere camı bulunur. Bu yüzden yaz mevsiminde duvar aşırı ısınır ve soğutma yükü artar. Sonuç olarak klasik Trombe duvarının iki temel sorunu vardır; (1) kalın duvar gereksinimi, (2) aşırı ısınma nedeniyle yazın iç ortam soğutma yükünün artması.

Bu çalışmada FDM Trombe duvarı Şekil 1.5’de görüldüğü gibi bu iki sorunu ortadan kaldıracak şekilde tasarlanmıştır. Yukarıda belirtilen birinci sorunu ortadan kaldırmak için yeni Trombe duvarında güneş enerjisi duyulur ısı şeklinde değil gizli ısı şeklinde depolanmaktadır. Çünkü birim kütle başına enerji depolama kapasitesinin yüksek olması nedeniyle, termal enerjinin faz değiştiren bir madde içerisinde gizli ısı olarak depolanması yöntemi diğer ısı depolama yöntemlerine göre çok daha caziptir. Örneğin betonun duyulur ısı enerjisi depolama kapasitesi 1,0 kJ/kg·K iken 29,7°C sıcaklıkta ergiyen kalsiyum klorür altı hidrat’ın ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) kapasitesi 193 kJ/kg’dır. Bu yüzden gizli ısı depolama sisteminin hacmi, duyulur ısı depolama sistemininkine göre çok küçük olacaktır.

Bu maksatla duvarın dış sıvası içerisine kapsüllenmiş faz değişim maddesi (FDM) katılmıştır. Sıvaya katılan FDM, kapsüller içerisinde faz değiştirdiğinden ergime esnasında sıva içerisine herhangi bir sızıntı olmayacaktır. Güneş enerjisinin gizli ısı şeklinde depolanması duvar kalınlığını azalttığı gibi, duvar sıcaklığını da ergime sıcaklığına bağlı olarak kontrol altında tutma olanağı sağlar. Çünkü FDM’leri dar bir sıcaklık aralığında faz değiştirirler ve duvar sıcaklığı faz değişim sıcaklığı ile sınırlandırılabilir.



Şekil 1.5. Bu çalışma için tasarlanan FDM Trombe duvarı

Kullanılacak olan FDM'nin ergime sıcaklığı aralığının tayini önemli bir konudur. Isıtma tekniği uygulamalarında, veriş havası sıcaklığı normalde 50°C alınırken kışın iç ortam konfor sıcaklığı ortalama 22°C alınır. Dolayısıyla bu değerler FDM ergime sıcaklığı için üst ve alt sınır değerler olarak kabul edilebilir. Bu durumda ergime sıcaklık aralığı bu limitler arasında kalacak şekilde birden fazla kapsüllenmiş FDM deneyerek, Erzurum iklim koşulları için uygun faz değişim sıcaklığı belirlenmelidir. Bu amaçla, deney odasının güney duvarı birbirinden bağımsız iki bölme halinde tasarlanmış ve farklı ergime sıcaklığına sahip iki ayrı kapsüllenmiş FDM denenmiştir.

Diğer yandan yeni Trombe duvarının ön tarafında normal cam yerine kendi tasarımıımız olan şeffaf yalıtım ünitesi (ŞYÜ) kullanılmıştır. ŞYÜ'nin iki fonksiyonu yerine getirmesi amaçlanmıştır; (1) kış aylarında iyi bir ısı yalıtımı sağlayarak FDM katılmış sıvadan dışarıya olan ısı kayıplarını azaltması, (2) kış güneşini maksimum, yaz güneşini ise minimum oranda geçirerek yaz aylarında duvarın ısınmasına engel olması.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Termal Enerji Depolama

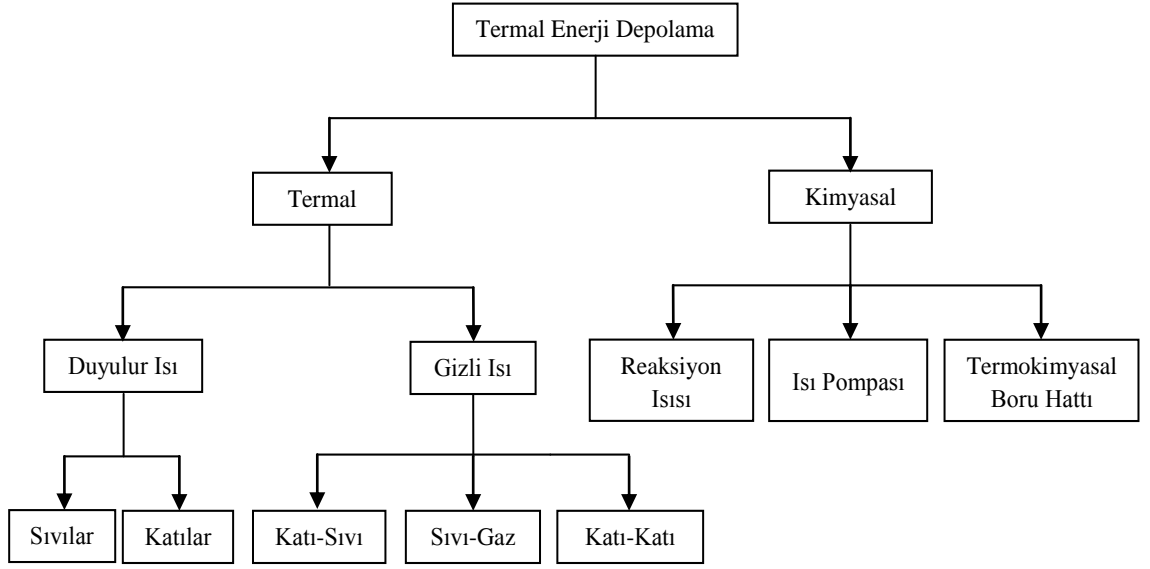
Termal enerji depolama sistemleriyle ozon tabakasına zarar veren kloroflorokarbonlara (CFC) gereksinim duymadan doğrudan soğutma-ısıtma yapılabilmektedir. Elektrik enerjisine duyulan gereksinim azalmakta ve elektriğe en çok ihtiyaç duyulan zamanlarda elektriğe aşırı yüklenme engellenebilmektedir. Böylece enerji santrallerine duyulan gereksinmeyi ve fosil yakıt kullanımını azaltarak çevreyi daha az kirleten çözümler sunmaktadır (Konuklu 2008).

TED sistemlerinin yararları şu şekildedir:

- Enerji giderlerinin azaltılması
- Enerji tüketiminin azaltılması
- Kapalı alanlarda daha temiz hava sağlanması
- İşlem kolaylığının artması
- Tesis kurma ve işletme maliyetlerinin düşmesi
- Kullanılan ekipman boyutlarının azalması, daha verimli ve daha etkin ekipmanlar
- Fosil yakıtların tüketiminin azaltılması
- Hava kirliliğinin azalması
- Atık enerji israfının önlenmesi
- Yenilenebilir enerji kaynaklarından maksimum yararlanılmasını sağlar (Dinçer and Rosen 2002).

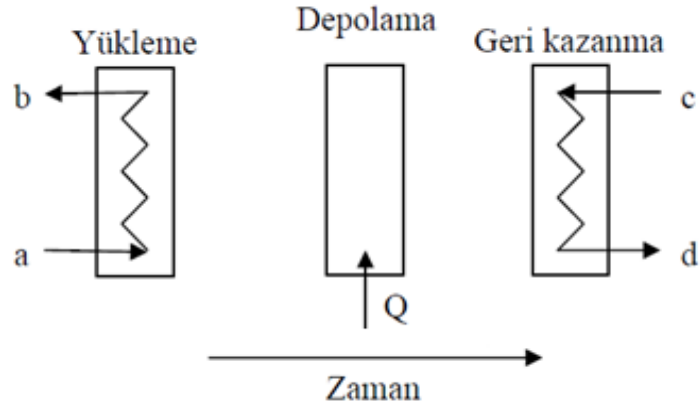
Isı enerjisini depolamak için temelde üç yöntem bulunmaktadır. Bunlar; duyulur, gizli ve termokimyasal ısı depolamalarıdır. Birincisi, malzemenin özgül ısısına bağlı olarak sıcaklığının düşmesi veya yükselmesi şeklindeki duyulur ısı depolamadır. İkinci tip olan gizli ısı depolama, maddenin faz değişimi esnasında ısı depolamadır. Üçüncü tip ise, maddelerin kimyasal reaksiyonları sırasında depoladığı veya terk ettiği ısı ile termokimyasal enerji depolamadır. Bu yöntemler birim hacimde depolayabildikleri

enerji bakımından ayrılırlar. Genel olarak, birim hacimdeki iç enerji değişiminin fazla olduğu ısı depolama materyali kullanılması durumunda, istenilen ısı miktarını depolamak için gereken hacim azalır (Mazman 2006). Isıl enerjinin 0-90°C gibi düşük sıcaklıkta depolanması için genel olarak kullanılan yöntemler Şekil 2.1’de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.1. Güneş enerjisinin termal depolanmasının farklı tipleri (Sharma *et al.* 2009)

TED sistemlerinin temelinde depolama sistemine enerji sağlanması, bu enerjinin depolanması ve depolanan enerjinin ihtiyaç duyulan zamanlarda kullanılması prensibi yatmaktadır. Bu kısaca; yükleme, depolama, geri kazanma olarak özetlenebilecek bir süreçtir (Şekil 2.2) (Dinçer and Rosen 2002).



Şekil 2.2. Bir TED sisteminin genel bileşenleri (Mazman 2006)

Güneş enerjisi, değişik teknikler kullanılarak ısı enerjisi şeklinde depolama sistemlerinde depolanmaktadır. Bu sistemlerde kullanılan depolama maddelerinin şu özellikleri yerine getirmeleri istenir:

- Birim kütle ve hacminin, ısı depolama kapasitesi büyük olmalı,
- Depolama verimi yüksek olmalı,
- Çalışma sıcaklık aralığında maddenin özellikleri uygun olmalı,
- Üniform sıcaklığa sahip olmalı,
- Sıcaklık gradientleri olmadan fazla miktarda ısıyı yükleyip boşaltabilmeli,
- Yükleme-boşaltma için tam bir tersinirlik göstermeli,
- Performans ve depolama kapasitesinde azalma olmaksızın pek çok sayıda yükleme-boşaltma yapabilmelidir,
- Yükleme-boşaltma esnasında çevreye çok az ısı kaybı olmalıdır,
- Isı yükleme ve boşaltma hızı yüksek olmalıdır,
- Isı depolama ömrü uzun olmalıdır,
- Ucuz olmalıdır,
- Korozif olmamalıdır,
- Yanıcı ve zehirleyici özellik göstermemelidir (Esen 1999).

2.1.1. Duyulur ısı

Isı depolama materyalinin sıcaklığındaki değişimi kullanarak yapılan depolamadır. Yani gerek depolama ve gerekse ısı enerjisini salıverme periyodunda, depolama ortamının sıcaklığı sabit kalmayıp değişmektedir. Depolanabilecek ısının miktarı; ortamın ısı kapasitesine, sıcaklıktaki değişim miktarına ve depolama materyalinin miktarına bağlıdır. Duyulur ısı, katı materyalde (toprak, kaya) veya sıvı materyalde depolanabilir. Duyulur ısı depolanmasında genellikle; su, etilen glikol, su-etilen glikol (%50-%50) ve bazı alkoller kullanılmaktadır (Paksoy 1992).

Duyulur ısı depolama sistemlerinin etkili olması kullanılan maddenin özgül ısısına ve eğer hacim önemli ise yoğunluğuna bağlıdır. Duyulur ısı depolama sistemlerinin en cazip özelliklerinden biri ısı yükleme ve boşaltma işlemlerinin tersinir olmasıdır. Yani sistemin ekonomik ömrü boyunca bu maddelerin ısıyı depolama ve boşaltma özellikleri devam eder (Brumleva 1974).

2.1.2. Gizli ısı

Maddenin faz değişimi sırasında aldığı ya da saldığı ısıdır. Depolama katı-sıvı, katı-katı, sıvı-buhar ve buhar-katı dönüşümleri kullanılarak gerçekleştirilebilir (Özonur 2004). Ancak uygulanabilirliğinin rahatlığı açısından en çok tercih edilen katı-sıvı dönüşümüdür.

Gizli ısı depolama yöntemleri için gerekli depo hacmi duyulur ısıya göre daha küçüktür. Örneğin suyun gizli ısısının duyulur ısısına oranı 80'dir. Bunun anlamı şudur: 1 kg buzun erimesi için gerekli enerji miktarı 1 kg suyun sıcaklığını 1°C artırmak için gerekli ısıdan 80 kat daha fazladır. Bu durum depo tasarımında önemli bir avantajdır. Dolayısıyla depolama ya da enerji dönüşümü için maliyeti de düşürür. Faz değiştiren maddeler (FDM) sabit bir sıcaklık aralığında depolama olanağı sağlar ve erime

sıcaklığına bağı olarak hem ısıtma hem de soğutma için kullanılabilirler (Feldman *et al.* 1986).

Gizli ısı depolama aşağıdaki durumlarda uygulanmaktadır;

- ✓ Kısa süreli depolamada
- ✓ Yüksek enerji yoğunluğu veya yüksek enerji kapasitesi gerektiğinde,
- ✓ Depo hacminin küçük olması gereken yerlerde,
- ✓ Sabit veya küçük bir sıcaklık aralığında enerji depolamaya ihtiyaç duyulduğunda (Abhat 1983).

Gizli ısı depolama yönteminin diğer tekniklere göre bazı üstünlükleri şunlardır:

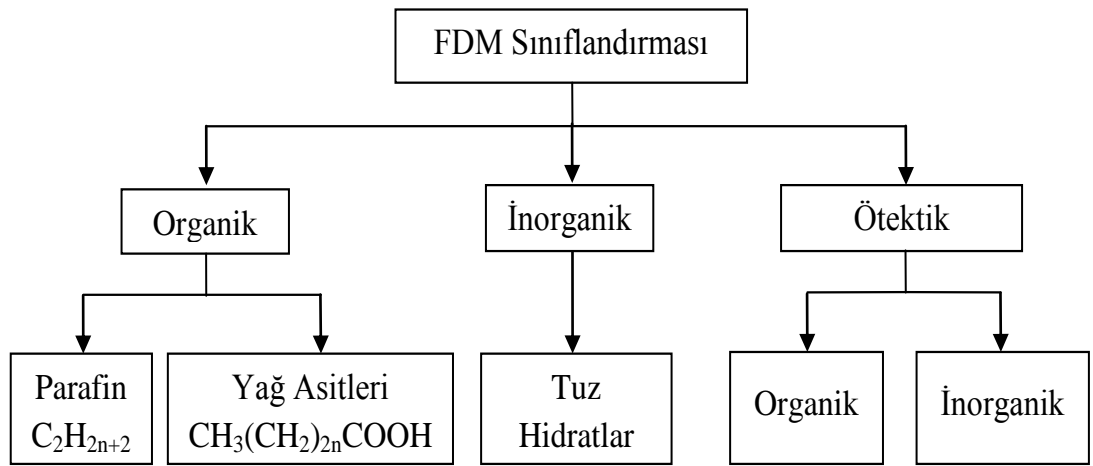
- ✓ Duyulur ısı depolamaya göre ısı depolama kapasitesi yüksektir ve ısı deposu hacmi daha küçüktür.
- ✓ FDM birim kütlelerinin ısı depolama kapasitesi yüksektir.
- ✓ FDM'lerin faz değiştirme sıcaklıkları, sabit sıcaklıkta ısı depolama ve geri kazanma için uygundur.
- ✓ Sabit sıcaklıkta ısı gerektiren uygulamalar için uygundur.
- ✓ Büyük boyutlu ısı depolama sistemlerinde ekonomik olarak uygulanabilir. (Öztürk ve Başçetinçelik 1999)

2.1.3. Reaksiyon ısısı

Kimyasal reaksiyon esnasında alınan veya verilen ısıdır. Egzotermik olarak tepkimeye girebilen kimyasal bileşiklerde tepkimeler süresince oluşan ve ayrılan kimyasal bağlarda enerjinin depolanması esasına dayanır. Yöntem birçok karmaşık süreci içerse de temeli endotermik olarak ısı alan tepkimenin egzotermik reaksiyonla bu ısıyı geri vermesi esasına dayanır. Reaksiyon ısısının enerji depolama için kullanılması yöntemine, termokimyasal enerji depolama denmektedir (Mazman 2006).

2.2. Faz Değiştiren Maddelerin Sınıflandırılması

Faz değiştiren maddelerin sınıflandırması Şekil 2.3'te verilmiştir. Organik, inorganik ve ötektik olmak üzere üç ana başlık altında toplanmaktadır. Pasupaty *et al.* (2008) FDM sınıflandırmasını yaparak ticari FDM'leri tablo halinde sunmuşlar ve faz değiştiren maddelerin yapı elemanlarına katılımlarıyla ilgili literatür derlemesi yapmışlardır.



Şekil 2.3. Faz değiştiren maddelerin sınıflandırılması (Pasupaty 2008)

İnorganik FDM'lere tuz hidratları örnek verilebilir. İnorganik FDM'lerin avantajları; yüksek ergime ısısı, iyi termal iletkenlik, ucuz ve yanıcı olmamaları, dezavantajları ise; korozif olmaları, aşırı soğuma göstermeleri, faz bozulması ve hidrat sayısında azalma şeklinde özetlenebilir.

Organik FDM'lere parafinleri ve yağ asitlerini örnek gösterebiliriz. Organik FDM'lerin avantajları; kimyasal yönden kararlı, az veya hiç aşırı soğuma göstermemesi, korozif ve toksik olmamaları, yüksek ergime ısısı ve düşük buhar basıncı göstermeleri, dezavantajları ise; düşük termal iletkenlik, faz değişimi sırasında büyük hacim değişimi, yanıcı olmaları şeklinde özetleyebiliriz (Konuklu 2008).

Organik FDM sınıfına ait olan parafinler ham petrolden elde edilen, çok sayıda alkandan oluşan doymuş hidrokarbon karışımlardır. Mumsu yapıdadırlar. Bunlar arıtma prosesinden sonra kokusuz, tatsız ve toksik olmayan maddelerdir. Parafinler düz zincirli ve dallanmış zincirli olmak üzere basit bir yapıda bulunurlar. Genellikle düz zincirli alkan karışımlarından oluşan parafinler kristalleşmeleri esnasında büyük miktarda gizli ısı yayarlar. Parafinlerde zincir uzunluğu arttıkça erime ve donma sıcaklığı ile erime ısıları da artar. Termal enerji depolama uygulamaları için, yüksek ısı depolama kapasitelerinden dolayı parafinler en çok kullanılan maddeler arasındadır. Geniş bir sıcaklık aralığında kullanılabilir. Parafinlerin belirli bir erime aralığında erimeleri TED uygulanacak alan içinde ayrıca bir avantajdır. Parafinler ucuz, bol ve kimyasal olarak kararlı olduklarından, genellikle ısı depolama için tercih edilirler. Korozif ve toksik etkiye sahip değildirler. İleri düzeyde aşırı soğuma göstermezler, kendi kendilerine çekirdekleşebilirler. Parafinler kimyasal ve fiziksel özellikleri açısından çeşitli uygulamalar için uygundur (Yılmaz 2008).

Organik ve inorganik maddelerin Ötektik karışımları sabit erime-donma noktasına sahip gizli ısı depolama maddeleridir. Maddelerin karışımlarında hem erime aralığı, hem ergime gizli ısı düşer. Ancak gene de bazı ötektikler kabul edilebilir bir ergime ısısına sahiptirler. Ötektik karışımların kullanılmasının sebebi kendi başına erime aralığı gereksinim duyulan bölgenin dışında olan maddelerin erime aralıklarını (ergime ısısında kabul edilebilir bir düşüş oluğu sürece) FDM olarak kullanılabilir bir bölgeye getirmektir. Hem organik hemde inorganik maddelerin ötektik karışımları mevcuttur (Lane 1983).

Organik ve inorganik maddelerin birbirine göre FDM olarak kullanılabilirliklerindeki avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. Organik ve İnorganik Maddelerin Kıyaslanması (Zalba 2003)

	Organikler	İnorganikler
Avantaj	Korozif değil Düşük ya da hiç aşırı soğuma Kimyasal ve ısıl kararlı	Yüksek faz değişim entalpisi
Dezavantaj	Düşük faz değişim entalpisi Düşük ısıl iletkenlik Yanıcılık	Aşırı soğuma Koroziflik Faz ayrışması Faz bozulması, ısıl kararsızlık

Katı-sıvı faz değiştiren maddelerden istenilen özellikler üç grupta toplanır (Sharma and Sagara 2005):

1. Termofiziksel özellikler

- i) Erime sıcaklığı istenen çalışma aralığında olmalıdır.
- ii) Birim hacim başına yüksek erime gizli ısısına sahip olmalıdır. Bu durum gerekli depo hacmini küçültür.
- iii) İlave duyulur ısı depolama işlemini sağlamak için yüksek özgül ısıya sahip olmalıdır.
- iv) Depolama sistemlerinin enerji yükleme ve boşaltmasını sağlamak için katı ve sıvı fazlarının yüksek ısı iletkenliğine sahip olması gerekir.
- v) Faz değişimi sırasında hacim değişimleri küçük olmalıdır ve depolama problemlerini azaltmak için çalışma sıcaklığındaki buhar basıncı küçük olmalıdır.
- vi) Her bir erime katılaşma çevrimi esnasında maddenin sabit depolama kapasitesi için faz değiştiren madde uygun erime noktasına sahip olmalıdır.

2. Kinetik özellikler

- i) Bir sıvı fazın aşırı soğumasını önlemek için yüksek çekirdeklenme hızına sahip olmalıdır.

- ii) Yüksek kristal büyüme hızına sahip olmalıdır. Bu durumda sistem depodan ısı dönüşüm ihtiyacını karşılayabilir.

3. Kimyasal özellikler

- i) Her iki yöndeki faz değişim hızı aynı (kimyasal denge) olmalıdır.
- ii) Erime/katılaşma çevriminde tam bir dönüşme (tersinirlik) olmalıdır.
- iii) Pek çok erime/katılaşma çevriminden sonra bozulmamalıdır.
- iv) Depo malzemesinde korozyon oluşturmamalıdır.
- v) Emniyet için zehirli, yanıcı ve patlayıcı olmamalıdır.
- vi) Ucuz olmalıdır.
- vii) Bol miktarda bulunabilmelidir.

2.3. Faz Değiştiren Maddelerin Isı Depolamada Uygulama Alanları

Zalba *et al.* (2003), FDM ile termal enerji depolama uygulamalarının kullanım alanlarını aşağıdaki gibi sınıflandırmıştır:

- ✓ Güneş enerjisinin termal depolanması
- ✓ Biyoklimatik binalarda pasif depolama
- ✓ Soğutma: buz bankası ve aşırı güç ihtiyacını azaltma uygulamaları
- ✓ Isıtma ve temiz su ihtiyacı
- ✓ Emniyet: bilgisayar ya da elektrik sistemlerinin bulunduğu odalarda sabit sıcaklığın sürdürülmesi
- ✓ Gıdaların ısı korunması: taşıma, dondurma ve pazarlama
- ✓ Gıda endüstrisi: şarap ve süt üretimi, seracılık
- ✓ Elektronik parçaların termal korunması
- ✓ Tıbbi uygulamalar: kan taşınması, ameliyat masası, sıcak-soğuk terapi
- ✓ Motor soğutma (elektrik ve içten yanmalı)
- ✓ Araçlarda termal konfor
- ✓ Ekzotermik kimyasal reaksiyonlarda ani sıcaklık yükselmelerini engelleme
- ✓ Uzay araçlarının termal sistemleri
- ✓ Güneş enerji panelleri

Şekil 2.4’de görüldüğü gibi FDM’ler farklı uygulama şekilleriyle, farklı alanlarda enerji tasarrufu amacıyla kullanılmaktadırlar.



Tedavide FDM uygulaması ve boiler için FDM (<http://www.aegisbt.com/>)



Kan Transferinde FDM (www.fskab.com/Annex17)



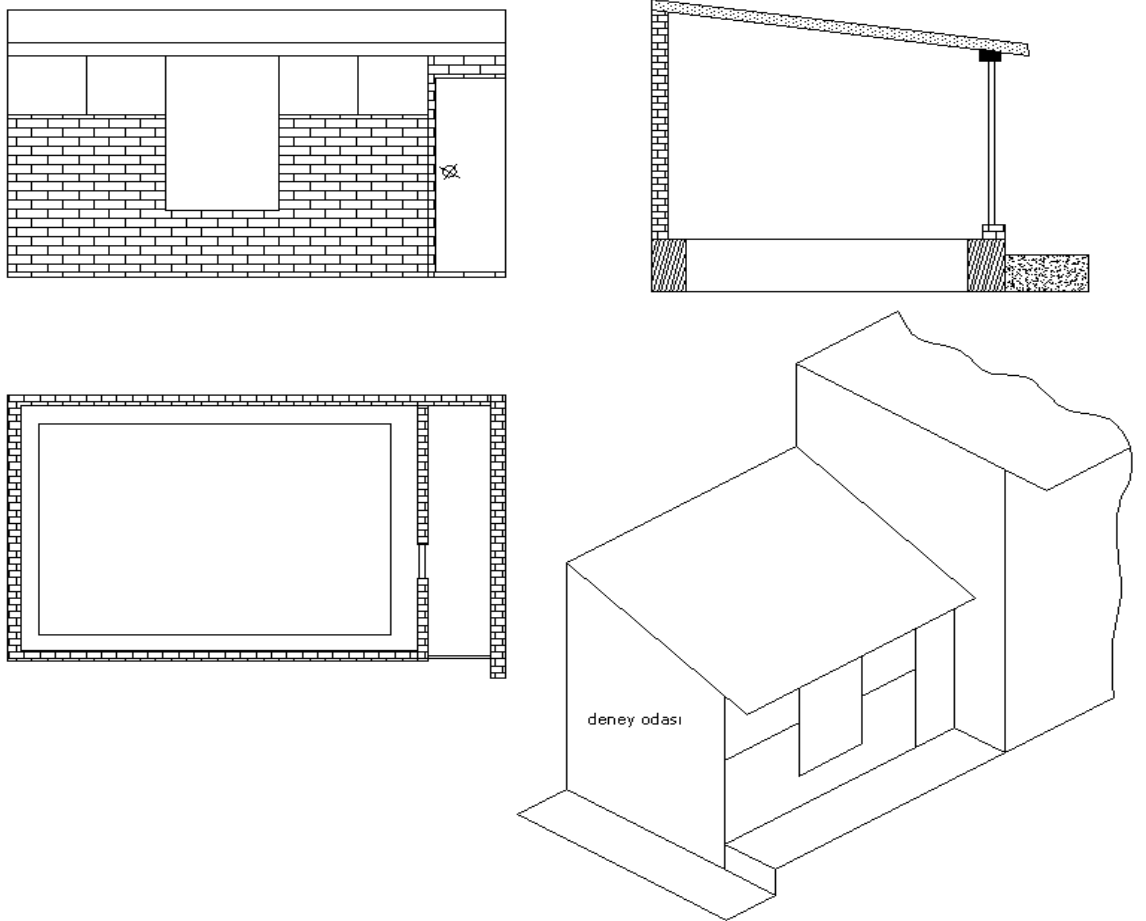
Laptop soğutucu ve pizza dağıtımında FDM çözümü (www.fskab.com/Annex17)

Şekil 2.4. FDM uygulamaları

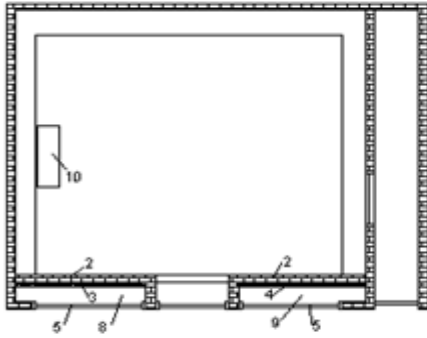
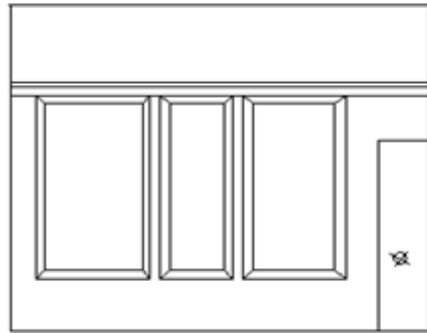
3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deney Odası ve FDM Trombe Duvarının İnşası

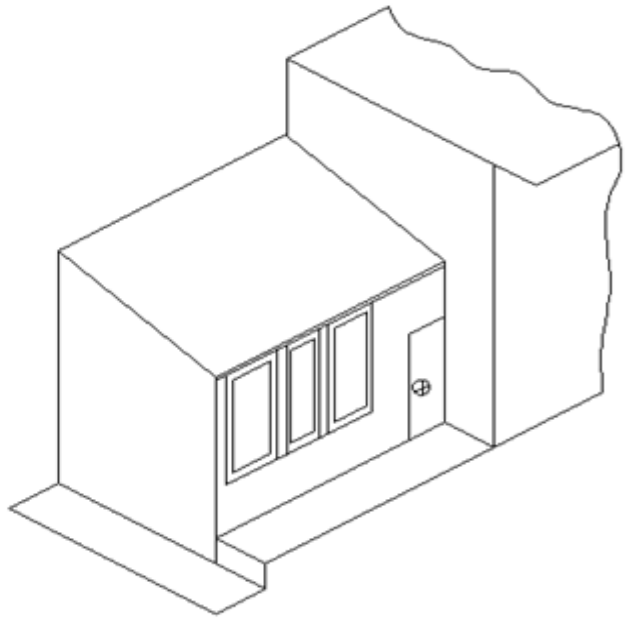
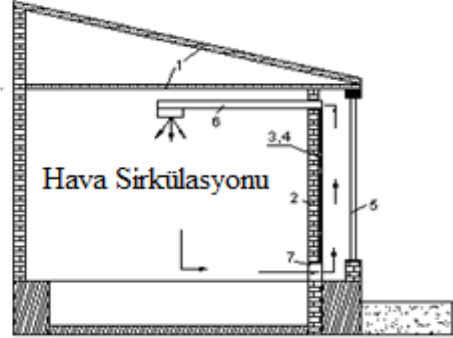
Planı Şekil 3.1’de görülen mevcut bir yapı, üzerinde talimat yapılarak deney odası haline getirilmiştir. Deney odasının son hali Şekil 3.2’de görülmektedir. Tadilat esnasında değişik aşamalarda çekilen fotoğraflar aşağıda görülmektedir. Deney odasının mevcut çatısı sökülerek duvarları 0,5 m yükseltilmiş, çatısı yenilenmiş, güney duvarı ise sağda ve solda iki bölme ortada ise aydınlatma penceresi olacak şekilde yapılmıştır (bkz. Şekil 3.3, 3.4). Dış duvarlar, çatı ve döşeme TS-825’e uygun olarak yalıtılmış ve boyanmıştır (bkz. Şekil 3.5, 3.6).



Şekil 3.1. Deney odasının ilk hali



- 1 Yalıtımlı çatı
- 2 Güney tuğla duvar
- 3 GR41 FDM içeren levhalar
- 4 GR35 FDM içeren levhalar
- 5 Şeffaf yalıtım ünitesi
- 6 üst menfez, hava kanalı, fan (2 adet)
- 7 Emiş menfezi (2 adet)
- 8 Bölme I (GR41 Bölmesi)
- 9 Bölme II (GR35 Bölmesi)



Şekil 3.2. Deney odasının tadilatın sonraki hali



Şekil 3.3. Güney duvarın yapılışı



Şekil 3.4. Çatının tamamlanışı

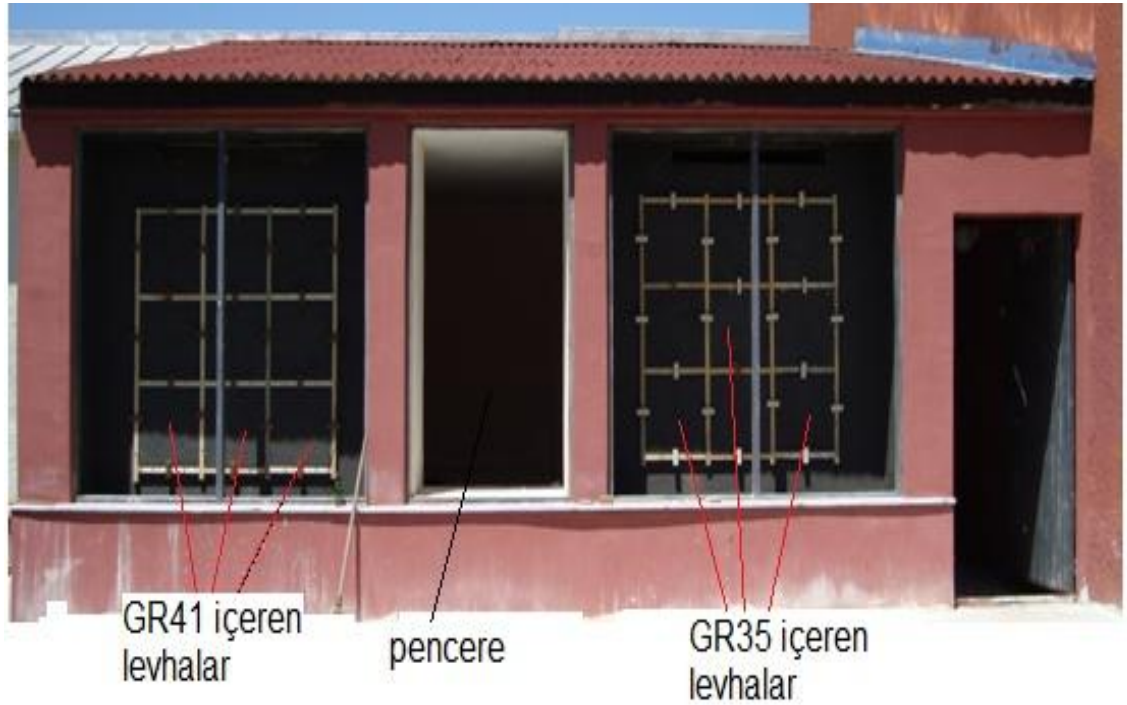


Şekil 3.5. Yalıtım



Şekil 3.6. Boya

Sonra kapsüllenmiş FDM içeren sıva levhaları hazırlanmış, GR41 FDM içeren levhalar I nolu bölmede ve GR35 FDM içeren levhalar ise II nolu bölmede duvara monte edilmiştir (bkz. Şekil 3.7).

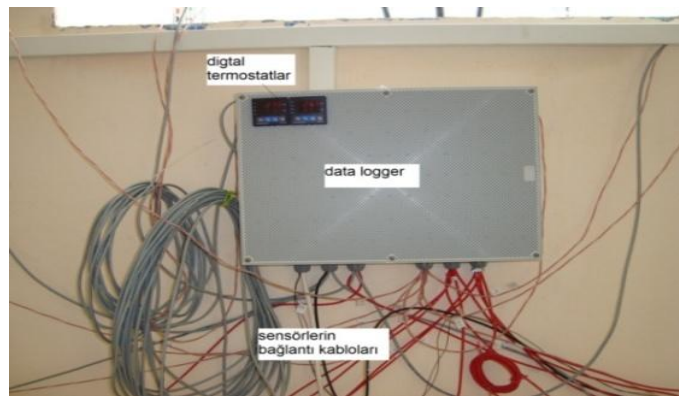


Şekil 3.7. FDM içeren sıva levhalarının duvara montajı

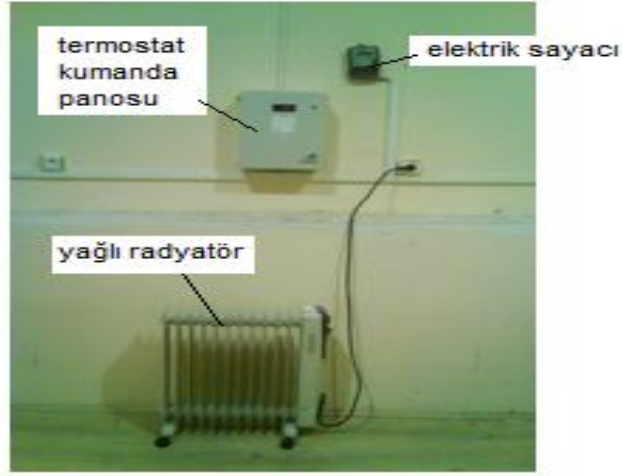
Görüldüğü gibi levhalar duvara sökülebilir bir şekilde monte edilmiştir. Böylece daha sonraki araştırmalarda bu levhalar farklı FDM içeren yeni levhalarla kolayca değiştirilebilirler. Sonra her iki bölmeye menfezler, hava kanalları ve fanlar monte edilmiştir (bkz. Şekil 3.8). Ölçme sensörleri yerlerine yerleştirildikten sonra (bkz. Şekil 3.9 ve Şekil 3.20) şeffaf yalıtım üniteleri yerlerine monte edilerek deney odasının tadilatı tamamlanmıştır (bkz. Şekil 3.2, Şekil 3.11). FDM levhalarda depolanan termal enerjiyi iç ortama taşımak için her bir bölmeye alt taraftan emme menfezleri üst taraftan ise hava kanalları ve fanlar monte edilmiştir (bkz. Şekil 3.8). Böylece bölme-I ve bölme-II ile iç ortam arasında cebri hava sirkülasyonu sağlanacaktır. Fanların kumandası dijital termostatlarla yapılmaktadır (bkz. Şekil 3.9). Ayrıca güneşin olmadığı saatlerde oda ısıtma ihtiyacını karşılamak için termostat kontrollü yağlı radyatörler oda içerisine monte edilmiştir (bkz. Şekil 3.10).



Şekil 3.8. Menfezler, hava kanalı, fan



Şekil 3.9. Dijital termostatlar, data logger



Şekil 3.10. Yağlı radyatör, kumanda panosu ve elektrik sayacı



Şekil 3.11. ŞYÜ'nin montajı ve deney odasının son hali

3.2. Kapsüllenmiş Faz Değişim Maddeleri

FDM'sinin bir kapsül içerisine hapsedildiği ürünlerdir. FDM olarak genellikle parafin wax kullanılır. Kapsül malzemesi olarak, kapsül içindeki PCM'in ergime esnasında kapsül dışına sızmasına izin vermeyecek bir malzeme seçilir. Sonuç olarak kapsüller kuruluşunu daima korumaktadır. Kapsül cidar malzemesi olarak genellikle inert ve kararlı bir polimer veya plastik kullanılmaktadır. Kapsüllenmiş FDM genellikle ya

mikro boyutlu ya da makro boyutlu olmak üzere iki şekilde üretilmektedir. Mikro kapsüller pudra görünümünde, makro kapsüller ise granül görünümündedir (bkz. Şekil 3.12, 13). Mikro kapsül FDM'leri daha çok tekstil endüstrisinde kullanılmaktadır, diğer yandan makro kapsüller ise yapı malzemelerine katılmak için çok uygundur.



Şekil 3.12. Mikro kapsülendirilmiş FDM (toz)



Şekil 3.13. Makro kapsülendirilmiş FDM (granüler)

Kullanılacak olan FDM'nin ergime sıcaklığı aralığının tayini önemli bir konudur. Isıtma tekniği uygulamalarında, veriş havası sıcaklığı normalde 50°C alınırken kışın iç ortam konfor sıcaklığı ortalama 22°C alınır. 50°C sıcaklıkta üfleme havası sağlamak için FDM ergime sıcaklığının bu değerin üstünde (55-60°C) olması gerekir. Fakat Erzurum'da kışın dış ortam sıcaklığı gündüz sıfırın altında -25°C civarına kadar düşmektedir. Isıl kayıpların yüksek olması nedeniyle 55°C ergime sıcaklığına ulaşmak mümkün olmayabilir. Bu değerlendirmeler ışığında bu ergime sıcaklığı için 50-25°C aralığı öngörülmüştür. Ergime sıcaklık aralığı bu limitleri arasında kalan iki farklı makro kapsülendirilmiş (granüler) FDM seçilerek, Erzurum iklim koşulları için uygun faz değişim aralığı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, yukarıda bahsedildiği üzere deney odasının güney duvarı birbirinden bağımsız iki bölme halinde tasarlanmış ve her bir bölmede farklı sıcaklıklarda ergiyen kapsülendirilmiş FDM denenmiştir. Bu FDM'lerin ticari isimleri,

- Rubitherm Granulate GR41
- Rubitherm Granulate GR35

şeklindedir (bkz. Şekil 3.14). Rubitherm firması tarafından üretilen bu ürünlerin adlarındaki GR kelimesi ürünün granüler olduğuna işaret eder. Bu ürünlerin her ikisi de makro kapsüllenmiş granüler haldeki parafindir.

Rubitherm GR35'in granül boyutu 1-3 mm aralığında değişmektedir. Pik ısı füzyon değeri yaklaşık 35°C civarındadır. Dolayısıyla ergime sıcaklığı anma değeri (nominal değer) 35°C'dir. 22-40°C aralığında faz değiştirir ve bu aralıktaki ısı füzyon değeri 41 kJ/kg'dır.



Şekil 3.14. Rubitherm granulate (makrokapsüllenmiş FDM)

Rubitherm GR41'in granül boyutu 1-3 mm aralığında değişmektedir. Pik ısı füzyon değeri yaklaşık 45°C civarındadır. Dolayısıyla ergime sıcaklığı anma değeri (nominal değer) 45°C'dir. 27-48°C aralığında faz değiştirir ve bu aralıktaki ısı füzyon değeri 64 kJ/kg'dır.

GR41 ve GR35 için DSC testleri yapılmış, bu testlerde ergime sıcaklığı-zaman grafikleri çizdirilmiş ve özgül ısı değerleri ölçülmüştür. Her iki FDM için DSC analizi sonuçları, sonuçlar bölümünde daha detaylı olarak irdelenmiştir. Kullandığımız FDM'lerin ergime sıcaklık limitleri, motivasyon bölümündeki öngörüye uygun olarak 22-48°C aralığındadır.

3.3. FDM İçeren Sıva Levhaları (Sıvapan)

Standart dış sıva harcına agreganın kütlesel olarak %33'ü oranında GR41 ve GR35 katılarak elde edilen karışım (bkz. Şekil 3.15) kalıplara dökülerek (bkz. Şekil 3.16) 2,5 cm kalınlığında ve 40cmx40cm boyutlarında FDM içeren sıva levhaları hazırlanmıştır (bkz. Şekil 3.17). BÖylece belirtilen boyutlarda 9 adet GR41 FDM ve 9 adet GR35 FDM içeren sıva levhaları imal edilmiş ve bunlar bölme-I ve bölme-II içerisine yerleştirilmiştir (bkz. Şekil 3.7). Levhalar duvara sÖkülebilir bir Şekilde monte edilmiştir. BÖylece daha sonraki araştırmalarda bu levhalar farklı FDM içeren yeni levhalarla kolayca değiştirilebilirler.



Şekil 3.15. FDM katılmış sıva harcı



Şekil 3.16. FDM içeren sıva levhaları



Şekil 3.17. FDM içeren sıva levhaları boyanıyor

Kapsüllenmiş FDM'nin sıva harcına hangi oranda katılacağına incelenmesi gerekir. Sıvanın FDM oranı arttıkça depolayacağı ısıl enerji miktarı artar fakat sıvanın adheransı (sıvanın duvar yüzeyine yapışma özelliği) ve mukavemeti zayıflar, bu durum sıvanın çatlayıp dökülmesine neden olur. Bu yüzden FDM oranı dikkatle tayin edilmelidir. FDM oranının sıva levhalarının fiziksel özellikleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla deney numuneleri imal edilmiştir.

Numunelerde GR41 ve GR35 agreganın %33'ü ve %50'si oranında karıştırılarak iki sınıf deney numuneleri hazırlanmıştır (bkz. Şekil 3.18, 19). Numunelerin basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ısı iletim katsayısı gibi termofiziksel özellikleri ölçülmüştür. Bütün bu testlerin sonuçları ve FDM sıva levhalarının kuru birim oranları sonuçlar bölümünde değerlendirilmiştir.



Şekil 3.18. Deney numuneleri



Şekil 3.19. Deney numuneleri

3.4. Ölçme Sensörleri

Deney odasında çeşitli noktalara sensörler monte edilerek (bkz. Şekil 3.20) aşağıda belirtilen parametreler ölçülmektedir:

- FDM katılmış levhaların ön ve arka yüzey sıcaklıkları,
- ŞYÜ'lerinin iç ve dış yüzey sıcaklıkları,
- güney duvarın iç yüzey sıcaklığı,
- oda sıcaklığı, dış hava sıcaklığı,
- toprak sıcaklığı,
- emiş menfezleri ve kanal girişlerinde hava sıcaklıkları,
- kanallardaki hava akış hızları,
- ŞYÜ üzerine gelen anlık ışıınım şiddeti,
- ŞYÜ'den geçen anlık ışıınım şiddeti,
- ŞYÜ ısı akısı değerleri,
- FDM sıva levhalarının ısı akısı değerleri,
- Isıtıcı yağlı radyatörlerin elektrik tüketimi,

Bu ölçümler için kullanılan sensörler aşağıdaki gibidir;

- 3 adet piranometre,
- 10 adet Pt100 yüzey sıcaklık sensörü,
- 6 adet Pt100 hava sıcaklık sensörü,
- 1 adet Pt100 toprak sıcaklık sensörü,
- 1 adet dış hava sıcaklık ve nem sensörü,
- 2 adet hava akış hız transmitteri,
- 1 adet cam tipi ısı akısı sensörü,
- 1 adet duvar tipi ısı akısı sensörü
- 1 adet elektrik sayacı.

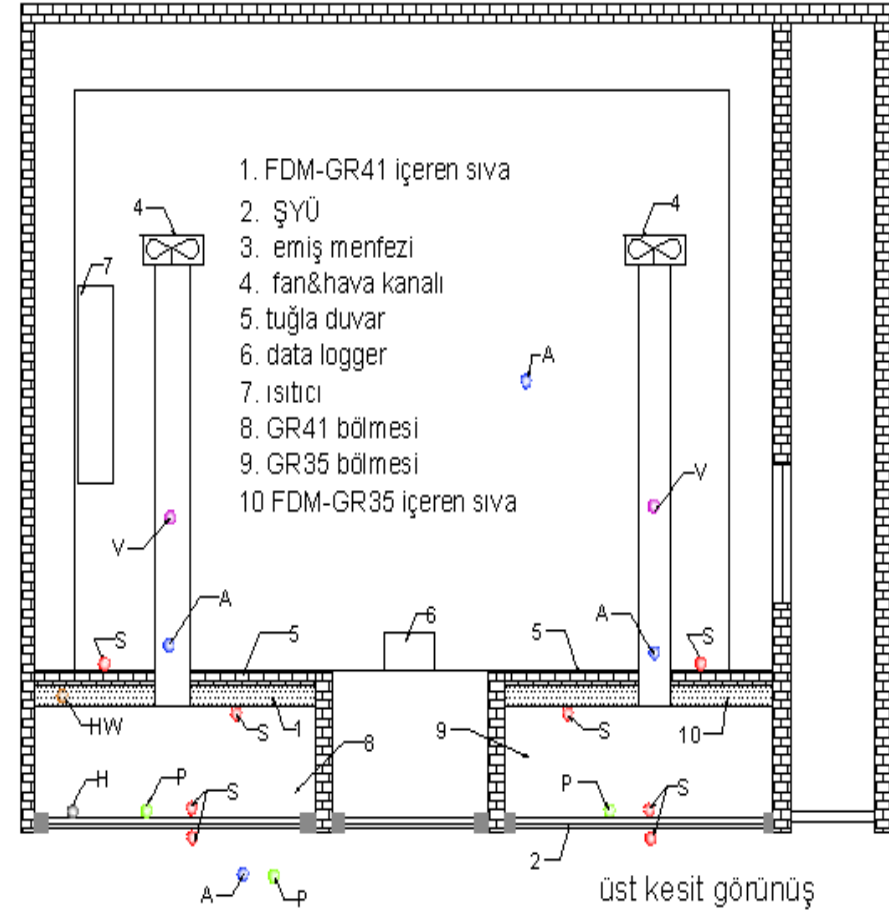
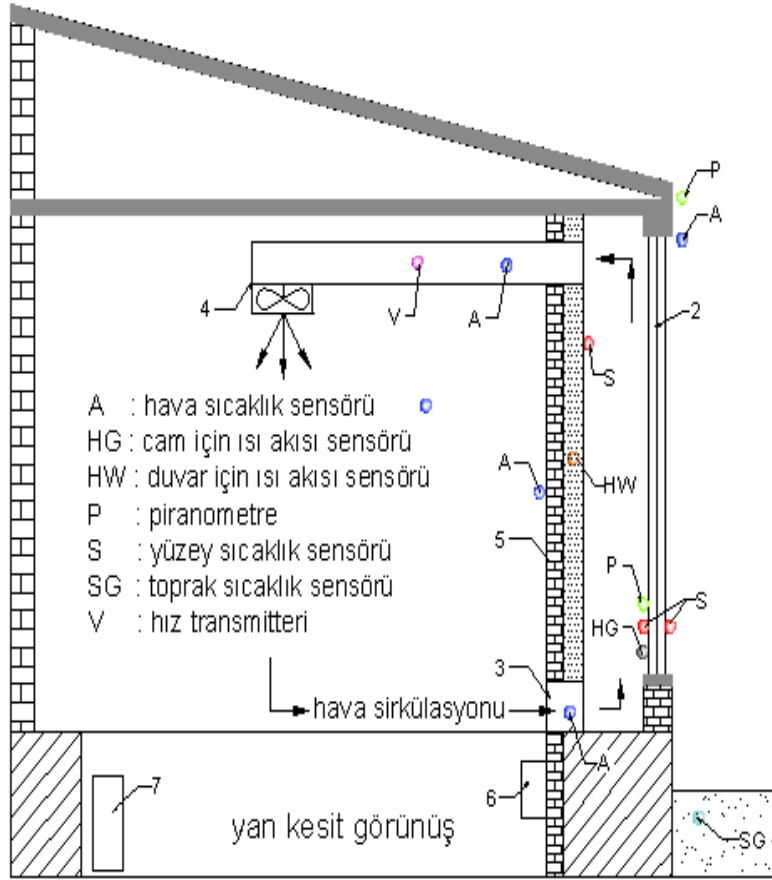
Sensörlerin deney odasındaki yerleşimi Şekil 3.20'de görülmektedir.

3.5. Şeffaf Yalıtım Ünitesi (ŞYÜ)

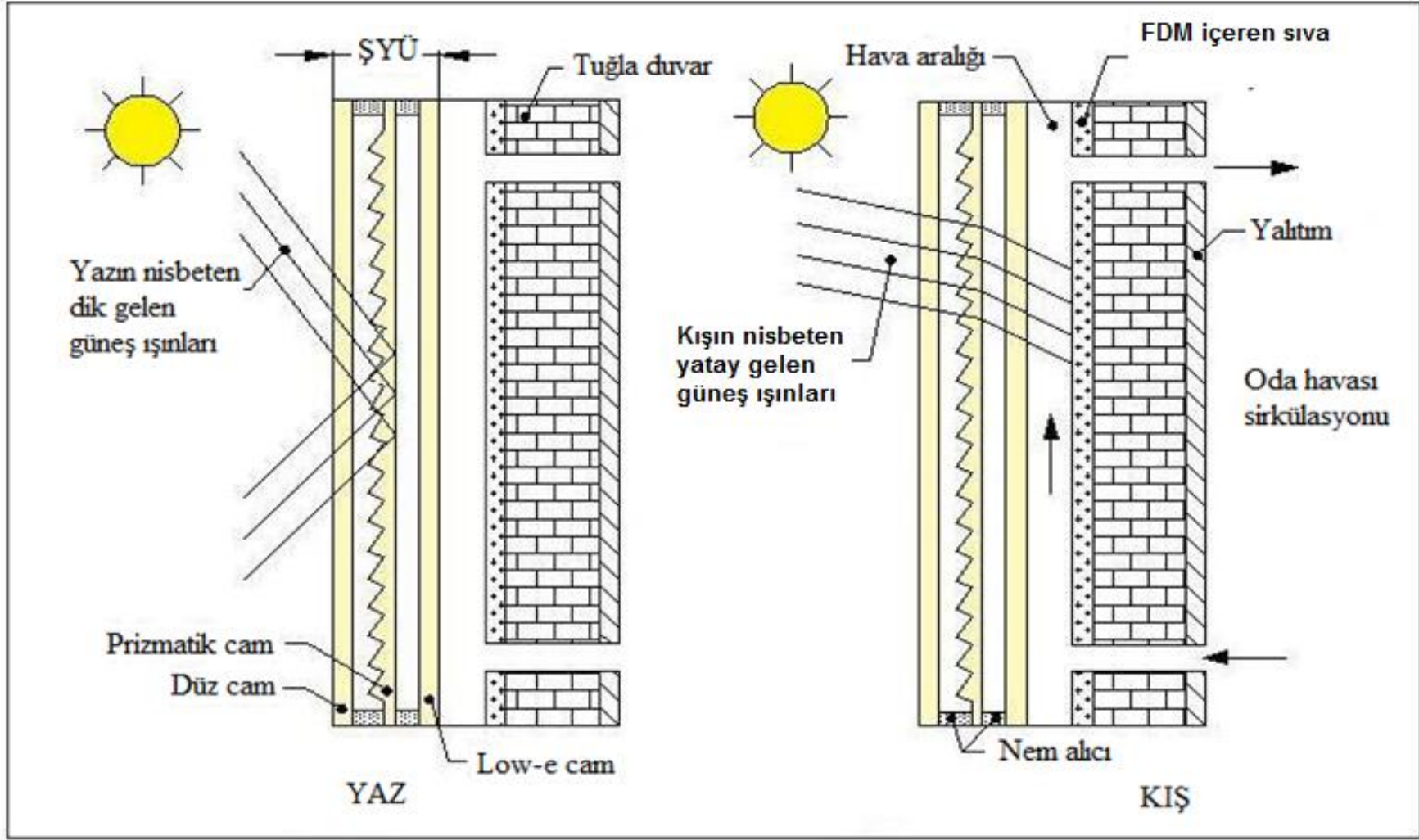
Şeffaf yalıtım ünitesi (bkz. Şekil 3.21) standart 3-camlı ısıcam görünümünde olmasına rağmen ortadaki prismaolar cam nedeniyle standart 3-camlı ısı camdan farklı olarak kış ve yaz güneşini ayırma görevini yerine getirir. Yazın nispeten dik gelen güneş ışınları prismaolar camdan geri yansır ve FDM içeren sıva yüzeyine ulaşamazlar. Böylece yazın güneş enerjisi duvarda depolanmaz ve iç ortamın soğutma yükü artmaz. Kışın ise ışınlar nispeten yatay gelir ve prismaolar camdan geçerek absorber yüzeye düşer, yüzey tarafından gizli ısı şeklinde depolanır ve hava boşluğunda sirküle edilen hava ile iç ortama taşınır. ŞYÜ'nin etkili bir ısı yalıtımı sağlaması için 3-cam ısıcam olarak yapılmasının yanı sıra dışarıdan içeri doğru üçüncü camın dışa bakan yüzeyine ısı kontrol (Low-e) kaplama yapılmıştır. Şeffaf Yalıtım Ünitesinin çalışma prensibi Şekil 3.21'de görülmektedir.

3.6. Sistemin Çalışması ve Otomasyon

Granüler FDM'ler için nominal ergime sıcaklıkları yukarıda belirtildiği gibi GR41 içeren sıva levhaları için 45°C, GR35 içeren levhalar için ise 35°C civarındadır. Fanların kumandası iki adet dijital termostatla yapılmaktadır (bkz. Şekil 3.9). Fanları kumanda eden dijital termostatlar bu ergime sıcaklıklarına set edilmişlerdir. FDM levha yüzeylerine monte edilen ve aynı zamanda termostat duyargası olarak servis yapan yüzey sıcaklık sensörleri, set sıcaklıklarını okuduklarında termostatlar fanları çalıştırır ve bölme-I ve bölme-II ile iç ortam (oda) arasında hava sirkülasyonu sağlanır, böylece FDM levhalarda depolanan termal ısı enerji iç ortama aktarılır (bkz. Şekil 3.20). Sensörler yaklaşık olarak 25°C sıcaklığı (iç ortam konfor sıcaklığının birkaç derece üstü) okuduğu zaman termostatlar fanları durdurur ve fanların üfleme tarafına monte edilen hava panjuru kapanarak hava sirkülasyonunu keser. Böylece kapalı havalarda ve gece periyodunda hem fanlar gereksiz yere çalışmamış hem de odanın ısı kaybı engellenmiş olmaktadır.



Şekil 3.20. Sensörlerin yerleşimi



Şekil 3.21. Faz değıştiren Trombe duvarın çalışma prensibi

Bölmelerde depolanan ısı enerji oda ısı yükünün tamamını karşılamayacağı için gerekli ilave ısı yağlı radyatörler ile sağlanmıştır. Yağlı radyatörlerin termostatları yeterince hassas olmadıkları gibi istenen çalışma rejimine de uygun olmadıklarından devre dışı bırakılmışlardır. Bu nedenle radyatörlerin kumandası hassas harici bir termostatla yapılmaktadır. Şekil 3.10'da görüldüğü gibi, radyatörlerin bağlı olduğu prizlere elektrik, kumanda panosu üzerinden gitmektedir. Kumanda panosuna 1 adet dijital termostat monte edilmiştir. Termostatın duyargası oda sıcaklığını ölçmekte ve oda sıcaklığı set değerinin (20°C) altına düştüğünde termostat pano içindeki bir kontaktör vasıtasıyla prizlere elektrik vermektedir. Oda sıcaklığı set değerinin 2°C üstüne çıktığında ise termostat devreyi kesmektedir. Radyatörlerin tükettiği enerji bir elektrik sayacı ile ölçülmektedir.

3.7. Deneysel Yöntem

Sensörler bir veri toplama cihazına (data logger) bağlanmıştır (bkz. Şekil 3.9). Cihazın okuduğu veriler RS hattı ile bilgisayara aktarılmakta ve bir yazılım vasıtasıyla 1 dk aralıklarla 24 saat boyunca kaydedilmektedir. Kullanılan yazılıma ait ara yüz Şekil 3.22'de görülmektedir.

Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü						
Y.(1) - GR36 Cam_I 15.7 °C	Y.(6) - GR36 Cam_D 23.1 °C	Y.(6) - GR41 Cam_I 23.2 °C	Y.(4) - GR41 Cam_D 15.5 °C	Y.(3) - PB_GR41 Ön 26.8 °C	Y.(8) - GR41_PB_Arka 27.4 °C	Y.(20) GR41 PB_Kontrol 25.9 °C
Y.(10) - GR36_PB_Ön 26.6 °C	Y.(7) - GR36_PB_Arka 27.4 °C	Y.(19) GR36_PB_Kontrol 25.6 °C	H.(18) - GR41 Menfez 24.0 °C	H.(14) GR41 Kanal 24.6 °C	V.(23) - GR41 Kanal 0.0 m/s	H.(12) - GR36 Menfez 24.1 °C
H.(11) GR36 Kanal 24.1 °C	V.(24) - GR36 Kanal 0.0 m/s	Pyr.(26) - Diğ 12.2 W/m2	Pyr.(26) - GR41 4.3 W/m2	Pyr.(22) - GR36 3.5 W/m2	HFP 01 (27) -0.010 W/m2 0.630 mV	PU 11 (21) -0.010 W/m2 0.200 mV
H.(16) - Oda Sic. Delikiz 23.6 °C	H.(17) - Oda Sic. Delikli 23.5 °C	Toprak Sic. (16) 21.9 °C	H.(13) Diğ Ortam Havası 15.7 °C	Y.(2) Yedek 23.4 °C	Y.(9) Yedek 23.3 °C	Kontrolör 1 Set 53.0 Kontrolör 2 Set 55.0
Tablo Görünümü	Tablo Görünümü 2					

Şekil 3.22. Yazılım ekranı

Fanlar, data logger ve bilgisayarın elektrik kesintilerinden etkilenmesini önlemek için güç kaynağı kullanılmaktadır. Ölçümler 15 aylık periyot için yapılmıştır. Ekim-2008'de başlanan ölçümlere Aralık-2009'da son verilmiştir. Ölçümlere aralıksız devam edilmiş ve her gün için 1 dk aralıklarla kayıt alınmıştır.

3.8. Matematik Model

Şeffaf yalıtım ünitesinin anlık ışınım geçirme oranı g ,

$$g = \frac{I_{g\zeta}}{I_{gl}} \quad (3.1)$$

denklemleriyle hesaplanır. Burada I_{gl} ŞYÜ dış yüzeyine gelen anlık ışınım şiddetini (W/m^2), $I_{g\zeta}$ ŞYÜ'den geçen ışınım şiddetini (W/m^2) göstermektedir. Anlık ışınım değerleri piranometreler ile ölçülmektedir.

Odaya aktarılan faydalı ısı gücü (W),

$$\dot{Q}_f(t) = \dot{m}c_p[T_{üm}(t) - T_{am}(t)] \quad (3.2)$$

Burada \dot{m} duvar hava boşluğundan geçen havanın (bkz. Şekil 3.1) kütleli debisini, c_p özgül ısısını, $T_{üm}(t)$ ve $T_{am}(t)$ ise sırasıyla herhangi bir anda sirkülasyon havasının üst ve alt menfezlerdeki sıcaklığını temsil etmektedir. Kütleli debi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\dot{m} = \rho V A_c \quad (3.3)$$

Burada V kanaldaki hava hızı, A_c kanalın kesit alanıdır.

ŞYÜ dış yüzeyine günlük gelen ve geçen güneş ışınım enerjisi (J/gün),

$$Q_{gl} = \int (I_{gl})(A) dt \quad (3.4)$$

$$Q_{g\zeta} = \int (I_{g\zeta})(A) dt \quad (3.5)$$

denklemiyle hesaplanır. Burada A şeffaf yalıtım ünitesinin alanıdır.

Odaya aktarılan günlük faydalı enerji (J/gün) ise,

$$Q_f = \int (\dot{Q}_f) dt \quad (3.6)$$

şeklinde hesaplanır. Duvarın günlük genel verimi,

$$\eta_g = \frac{Q_f}{Q_{gl}} \quad (3.7)$$

şeklinde hesaplanır.

Isıtma yükü karşılama oranı

$$IYKO = \frac{Q_f}{Q_f + Q_{el}} \quad (3.8)$$

denklemiyle belirlenir. Burada Q_f faydalı enerji (kJ), Q_{el} (kJ) ise elektrik enerjisidir. Denklem (3.8)'in paydası ısıtma yüküdür.

Aylık gelen ve geçen güneş enerjisi ile faydalı enerjiler ise günlük enerjilerin toplamı şeklinde hesaplanır.

3.9. Veri Analizi

Kaydedilen veriler yukarıda verilen matematik model kullanılarak, anlık, günlük ve aylık analizler yapılmış, parametrelerin değişimini gösteren çeşitli grafikler hazırlanmıştır. Yapılan analizin hacmi yeterince büyük olduğundan bütün bu veri işleme ve analiz etme işlemleri için Excel ortamında bir program yazılmıştır. Bu programa ham veriler aktarılmış ve gerekli hesaplamalar yapılarak ilgili grafikler çizilmiştir.

3.10. Belirsizlik Analizi

Sıcaklık ölçümü için kullanılan Pt100 tipi sensörlerin ölçme belirsizliği üretici firma tarafından $\pm(0,15^{\circ}\text{C}+0,002\times T)$ şeklinde verilmektedir, burada T, ($^{\circ}\text{C}$) biriminde ölçülen sıcaklıktır. Işınımölçer olarak AHLBORN firmasının ürünü olan FLA613GS serisi toplam ışınımölçer kullanılmıştır ve DIN 5032 normuna göre ölçüm belirsizliği $\pm(\%6)$ olarak verilmektedir. E+E Elektronik firmasının ürünü olan EE57 tipi hava hız transmitteri için ölçüm hassasiyeti $\pm(0,2 \text{ m/s}+0,03\times V)$ olarak verilmektedir, burada V ölçülen hız değeridir. Isı akısı ölçmek için Hukseflux firmasının PU11 ve HFP01 tipi sensörleri kullanılmış olup sensörlerin hassasiyetleri $\pm(\%5@20^{\circ}\text{C})$, sıcaklığa bağlı belirsizlik $\pm(\%0,17\times T)$ şeklinde verilmektedir, burada T (K) biriminde ölçülen sıcaklıktır. Elektrik tüketimi için MAKEL firmasının M300 serisi elektronik sayacı kullanılmıştır ve sayacın doğruluk değeri “sınıf 1” ($< \pm \%1$) olarak verilmektedir.

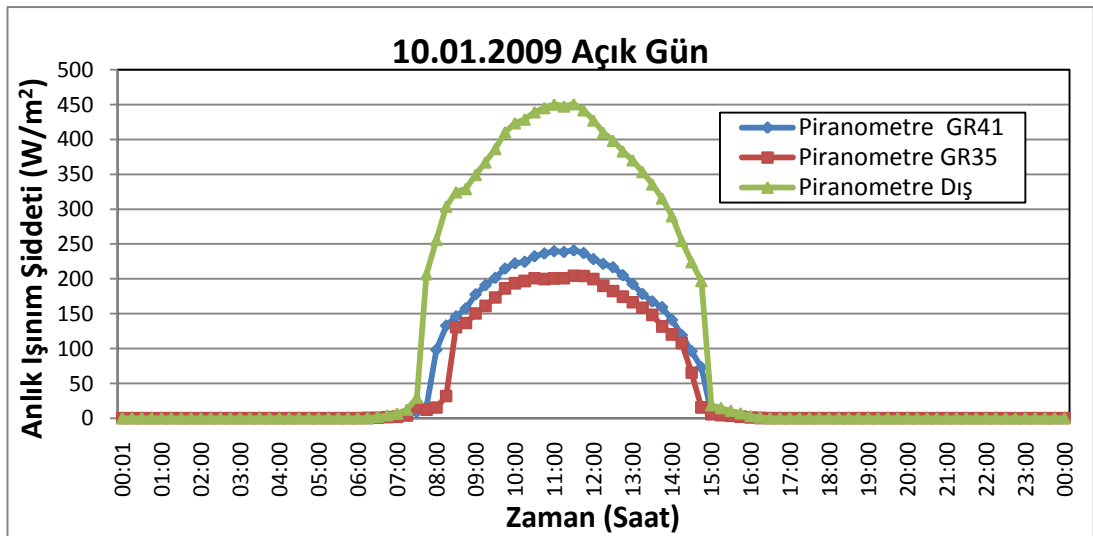
Kline ve McClintock (Holman 1994) tarafından verilen belirsizlik analiz yöntemi kullanılarak faydalı ısı \dot{Q}_f için deneysel belirsizlik $\pm(\%12)$ olarak hesaplanmıştır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

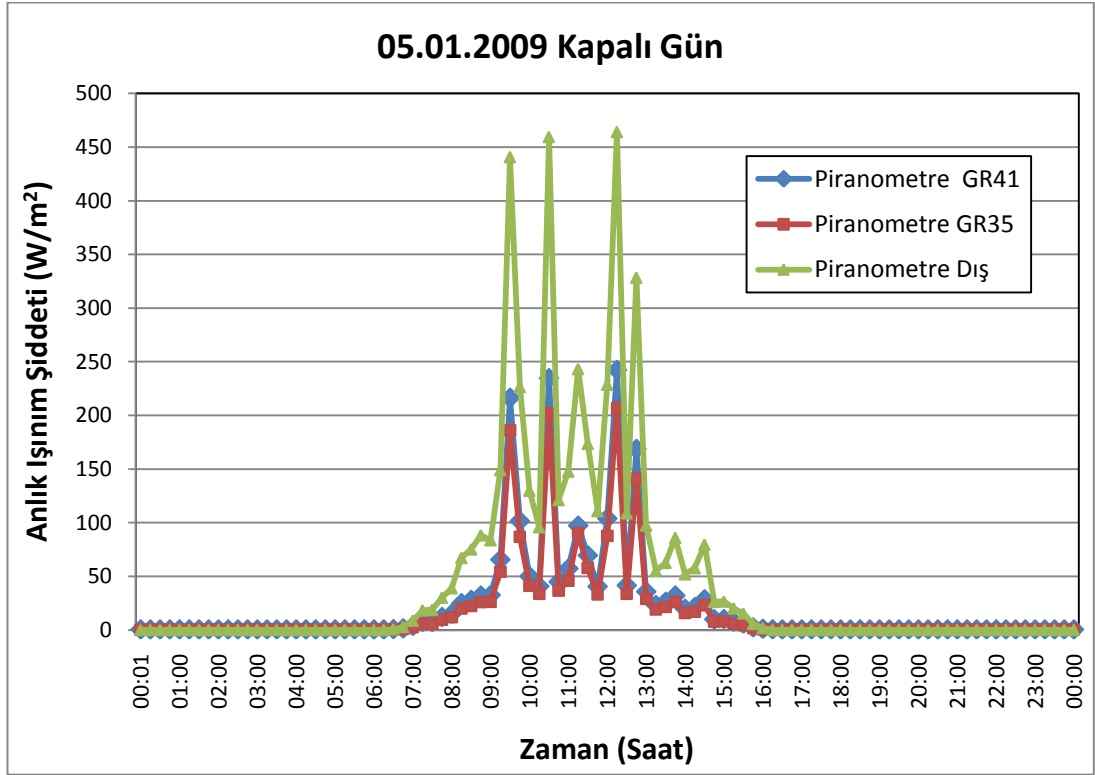
4.1. Günlük Analiz

Şekil 4.1’de 10 Ocak 2009 gününe ait anlık ışınım değerleri (piranometre) görülmektedir. Burada görülen “piranometre dış” eğrisi incelenerek günün açık, parçalı bulutlu veya kapalı olduğu belirlenmektedir. Örneğin Şekil 4.1’den 10 Ocak 2009 tarihinin açık bir gün olduğunu, Şekil 4.2’den 05.01.2009 tarihinde havanın kapalı olduğunu ve Şekil 4.3’den ise 16.01.2009 tarihinde havanın parçalı bulutlu veya yarı açık olduğunu anlamaktayız.

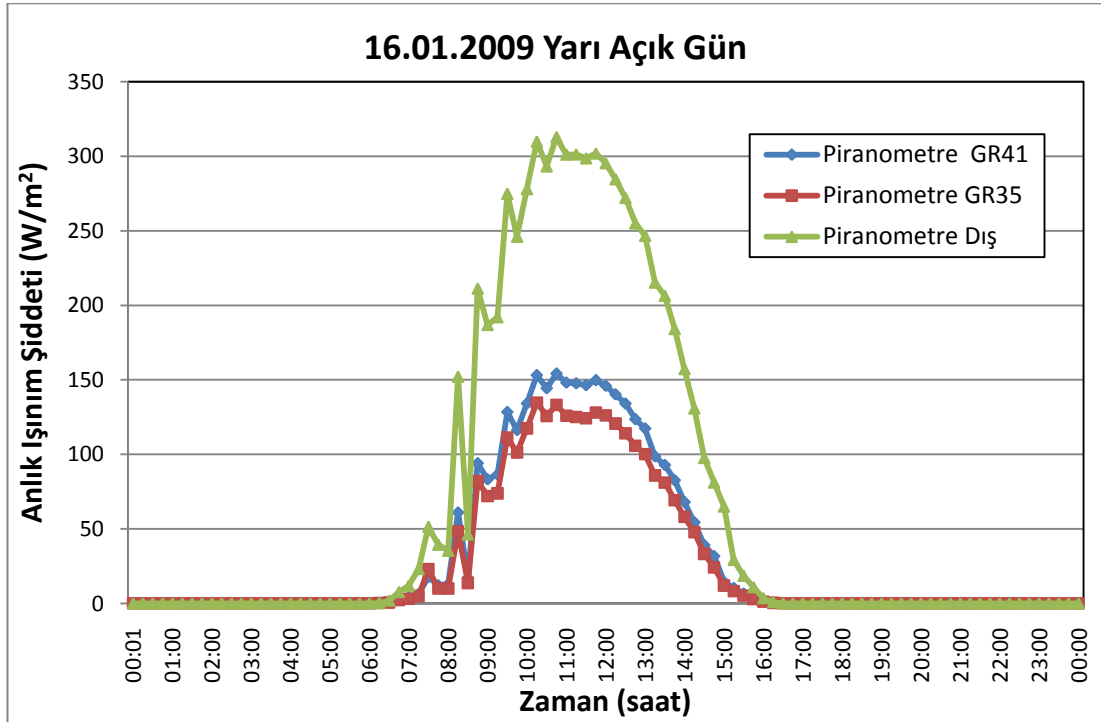
Işınım grafiklerindeki “piranometreGR41” veya “piranometreGR35” eğrileri ŞYÜ’den geçen ışınımın gün içindeki değişimini göstermektedir. Dolayısıyla anlık ışınım grafiği aynı zamanda ŞYÜ’nün ışınım geçirgenliği hakkında bilgi vermektedir. Işınım verileri Denklem (3.1)’de yerine yazılarak ŞYÜ’nin anlık ışınım geçirgenliği hesaplanmaktadır. Şekil 4.4’de şeffaf yalıtım ünitesinin ışınım geçirgenliğinin gün içindeki değişimi görülmektedir. Güneşin geliş açısına göre değişen solar geçirgenlik, ışınların güney cepheye nispeten dik geldiği gün ortasında maksimum olmaktadır.



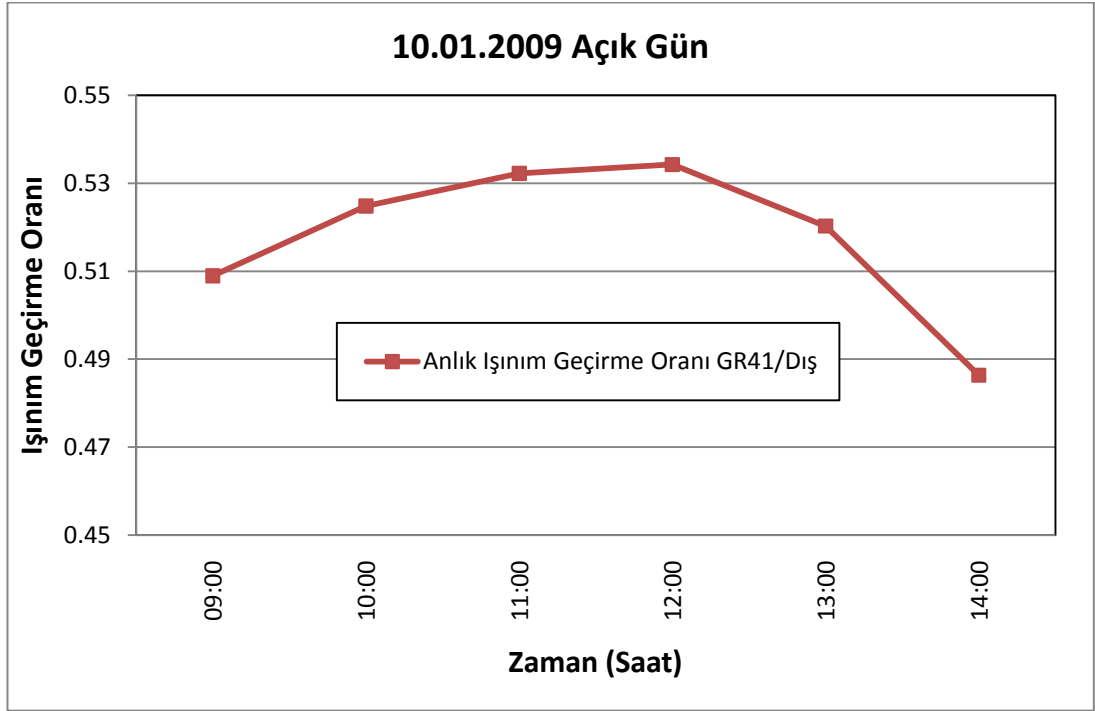
Şekil 4.1. Açık bir güne ait piranometre grafiği



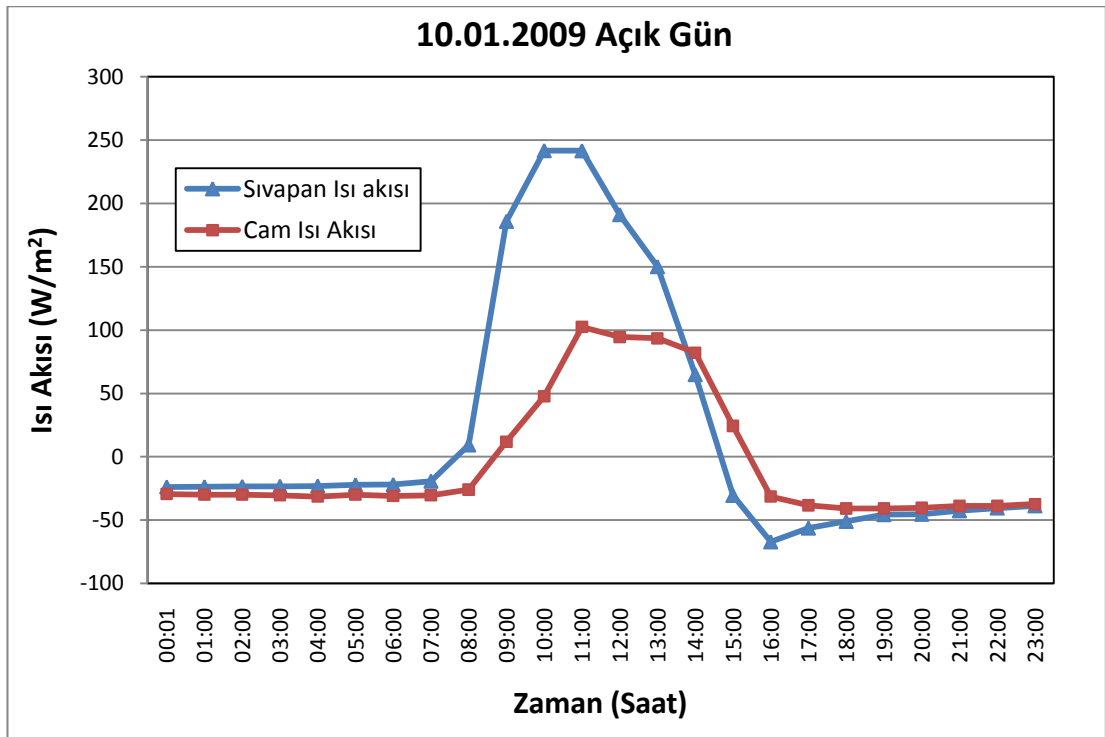
Şekil 4.2. Kapalı bir güne ait piranometre grafiği



Şekil 4.3. Yarı açık bir güne ait piranometre grafiği



Şekil 4.4. Açık bir güne ait ışınım geçirme oranı grafiği

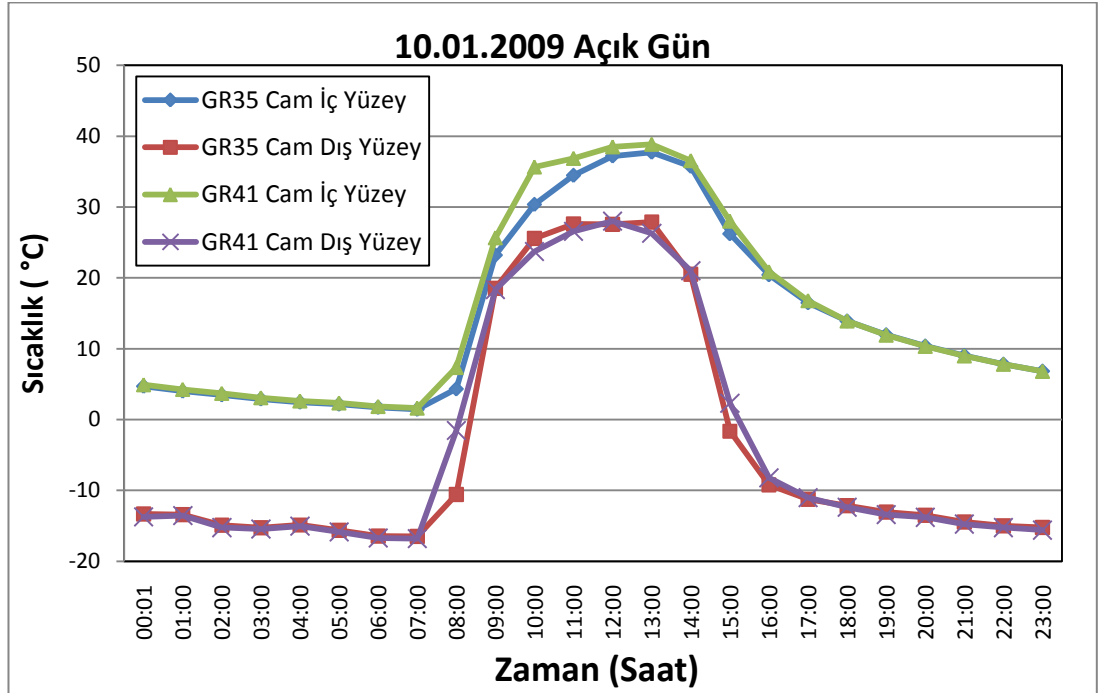


Şekil 4.5. Açık bir güne ait sıvapan ve camın ısı akısı grafiği

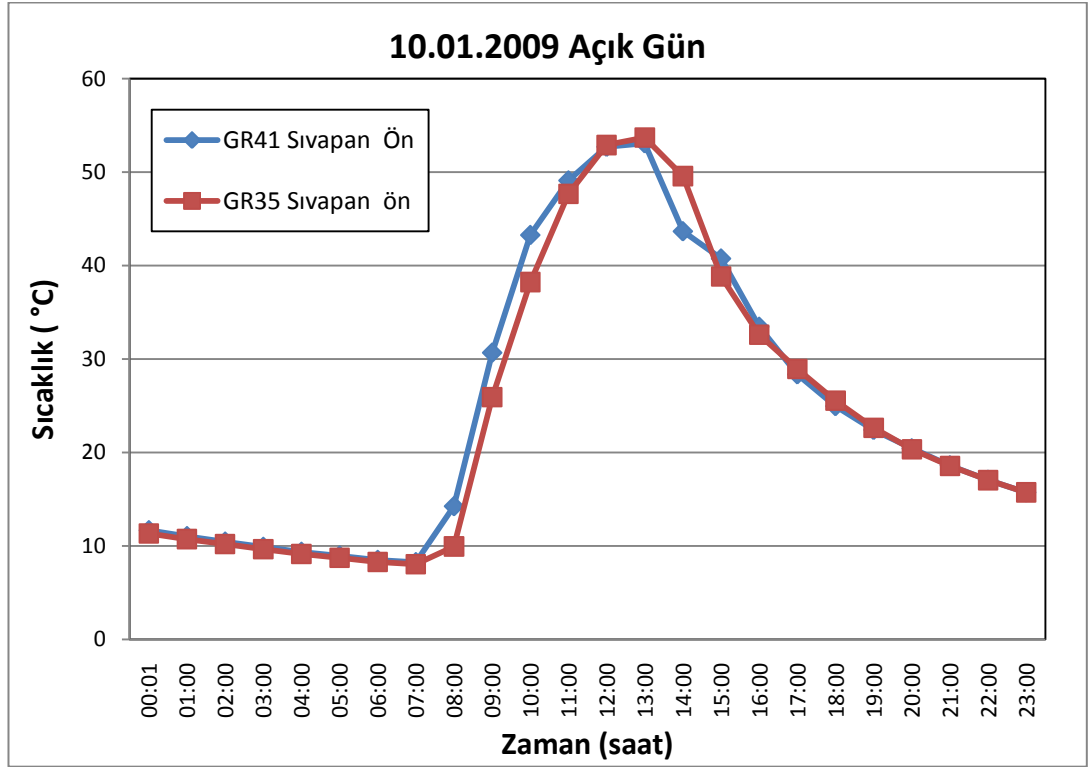
Şekil 4.5’de, sıvapan ve camın birim yüzeyinden her iki yönden geçen ısı akısı görülmektedir. Isı akısı sensörleri sadece GR41 tarafındadır. Pozitif değerler şeffaf yalıtım elemanına güneşten enerji geldiğini ve sıvapan içinde enerji depolandığını, negatif değerler ise sıvapanların ŞYÜ üzerinden dışarıya enerji kaybederek soğuduğunu gösterir.

Şekil 4.6’da ŞYÜ iç yüzey sıcaklığının gece saatlerinde ŞYÜ dış yüzey sıcaklığına göre daha yüksek kaldığı görülmektedir. Bunun nedeni ise içteki camın dışa bakan yüzeyinin Low-e kaplı olmasıdır. Şekil 4.7’de verilen sıvapan ön yüzey sıcaklıklarının göreceli yüksek olması yine low-e kaplamanın etkisiyle açıklanabilir.

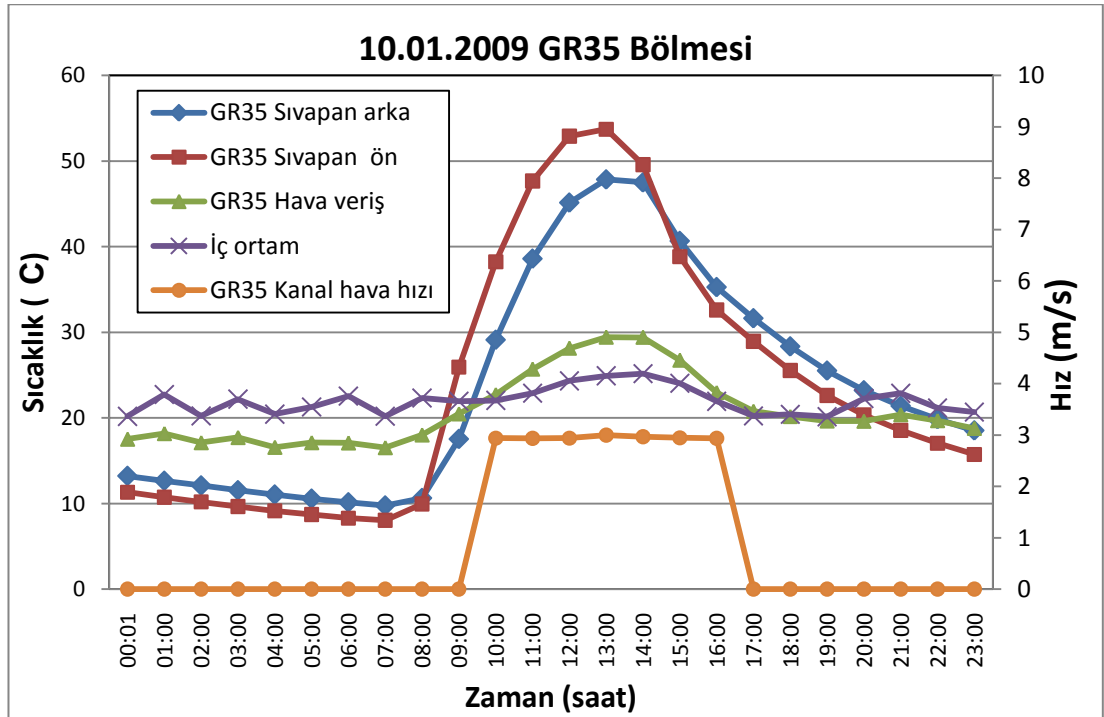
Şekil 4.8 ve 9’da her iki bölme için sıvapanların yüzey sıcaklıklarını, sirkülasyon havasının kanal girişindeki sıcaklıklarını ve en önemlisi hava kanallarındaki hava akış hızlarını görmekteyiz. Fanların ne zaman açtığını ve kapandığını, o anlardaki sıvapan yüzey sıcaklıklarının ne olduğunu ve gün içinde kanaldaki hava sıcaklıklarının (hava veri sıcaklığının) seyrini görmek mümkündür.



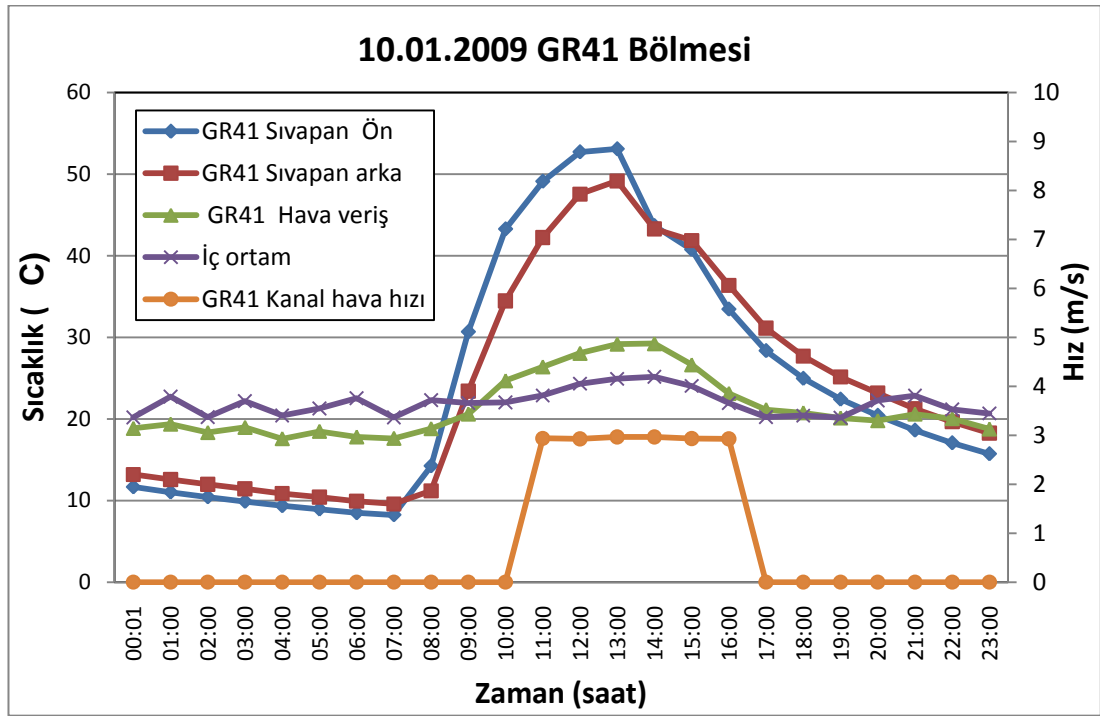
Şekil 4.6. Açık bir güne ait ŞYÜ yüzey sıcaklıkları grafiği



Şekil 4.7. Açık bir güne ait sıvapan sıcaklıkları grafiği



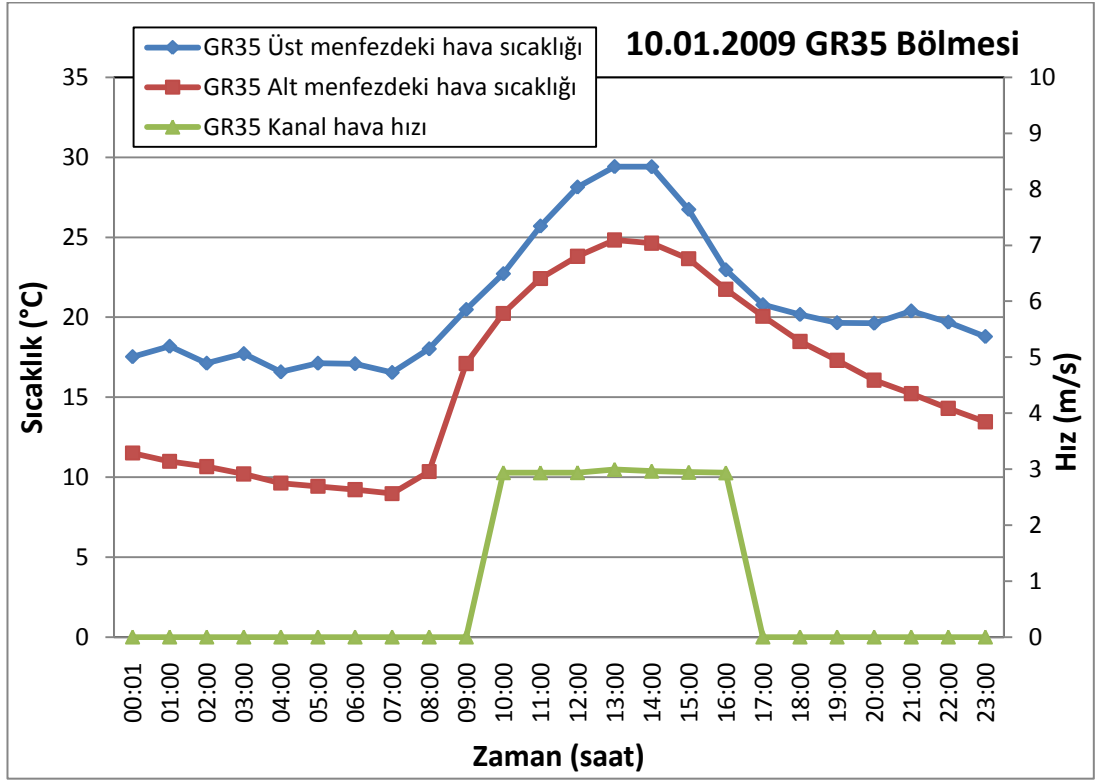
Şekil 4.8. GR35 bölümü yüzey sıcaklıkları ve kanal hava hızı grafiği



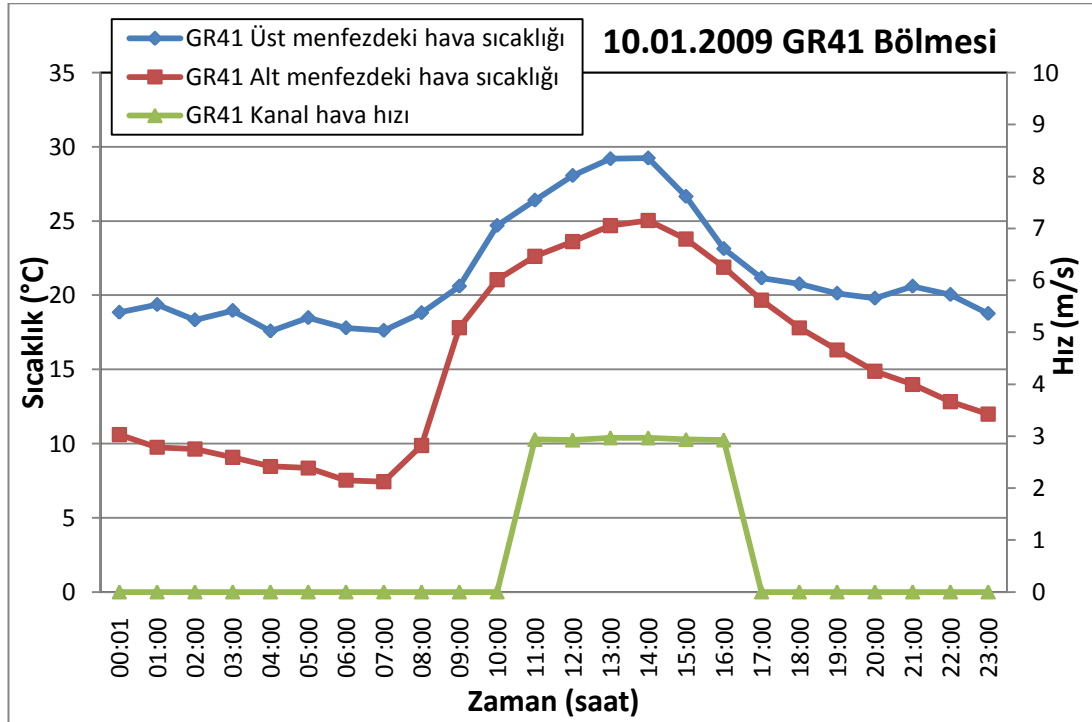
Şekil 4.9. GR41 bölgesi yüzey sıcaklıkları ve kanal hava hızı grafiği

Şekil 4.9’da sıvapanların ön yüzey (güneşi gören yüzey) ve arka yüzey sıcaklıklarına bakılırsa, ön yüzey sıcaklığı saat 8:00-14:00 arasında arka yüzeyin sıcaklığından büyük seyretilmektedir, bunun nedeni gelen ışınımın etkisiyle ısı geçiş yönü sıvapanın ön yüzeyinden arkaya doğrudur, yani sıvapana net ısı girişi vardır, bu nedenle Şekil 4.5’de saat 8:00-14:00 sıvapan ısı akışı eğrisi pozitif bölgededir, saat 14:00’ten sonra, ışınım etkisini kaybetmiştir, dolayısıyla sıvapan soğumaktadır. Bu yüzden Şekil 4.9’da sıvapanların ön yüzey ve arka yüzey sıcaklıklarına bakıldığında arka yüzey sıcaklığı saat 14:00-08:00 arasında ön yüzeyin sıcaklığından büyük seyretilmektedir, yani sıvapandan net ısı kaybı vardır ve bunu Şekil 4.5’de eğrinin saat 14:00’ten sonra 08:00’e kadar negatif bölgede olmasından da anlamaktayız.

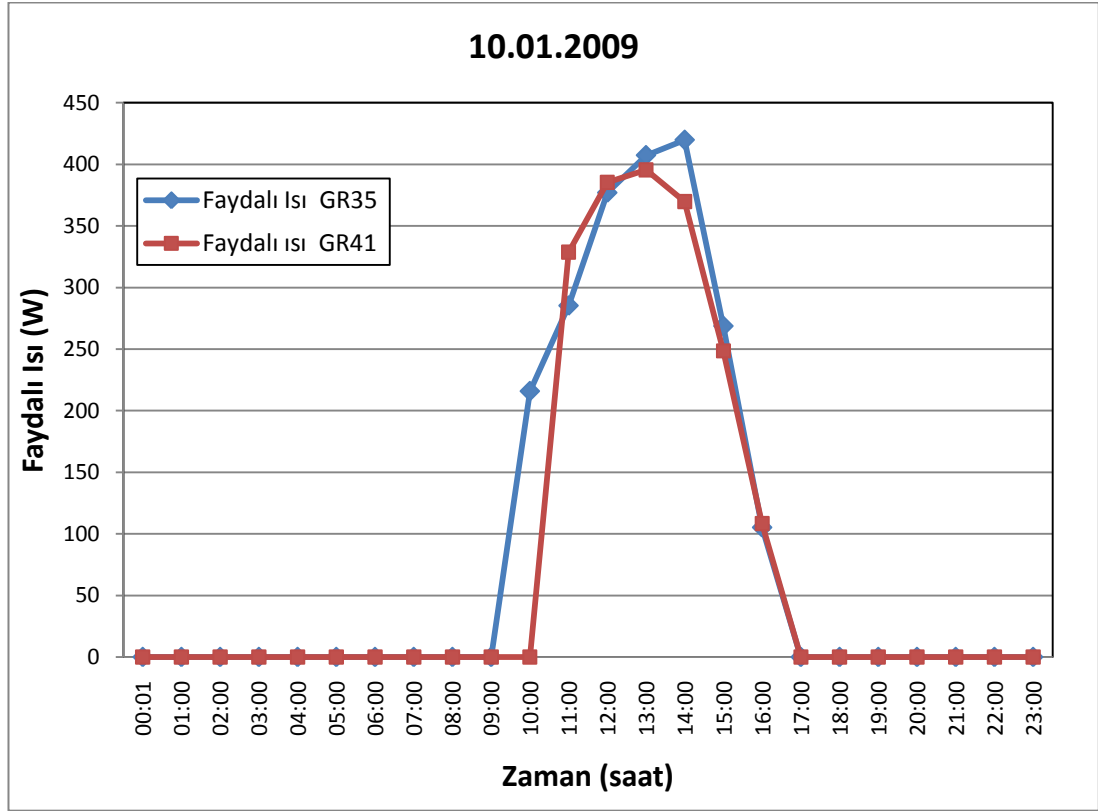
Odaya verilen faydalı ısı (W), denklem (3.2) kullanılarak hesaplanmaktadır. Denklemde yer alan üst ve alt menfezlerdeki hava sıcaklıkları Şekil 4.10 ve 11’de görülmektedir. Bu grafiklerdeki kanal hava hızı denklem (3.3)’te yerine yazılarak kütleli debi hesaplanmaktadır. Bu şekilde zamanın bir fonksiyonu olarak hesaplanan faydalı ısı gücü Şekil 4.12’de görülmektedir.



Şekil 4.10. GR35 üst-alt menfez hava sıcaklıkları ve kanal hava hızı grafiği

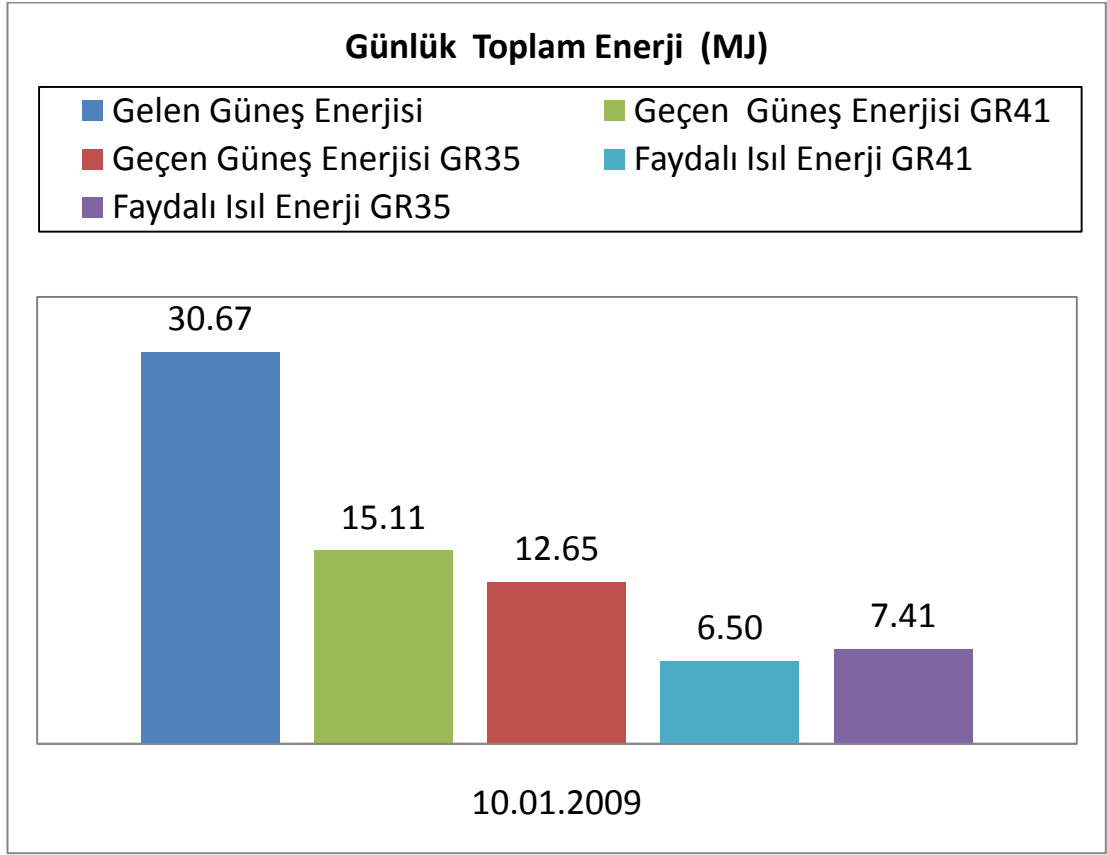


Şekil 4.11. GR41 Üst-alt menfezlerdeki hava sıcaklıkları ve kanal hava hızı grafiği



Şekil 4.12. GR35 ve GR41 Faydalı ısı grafiği

ŞYÜ üzerine gelen ve geçen ışınım enerjisi Şekil 4.1'deki piranometre eğrileri altında kalan alanlardır. Odaya aktarılan faydalı enerji (MJ/gün) ise Şekil 4.12'deki eğrilerin altında kalan alanlardır. Bu alanlar (3.4), (3.5) ve (3.6) denklemlerinin sayısal olarak integre edilmesiyle hesaplanmışlardır. Bu yolla elde edilen günlük enerji değerleri Şekil 4.13'de toplu olarak görülmektedir.



Şekil 4.13. 10.01.2009 tarihine ait günlük enerji değerleri grafiği

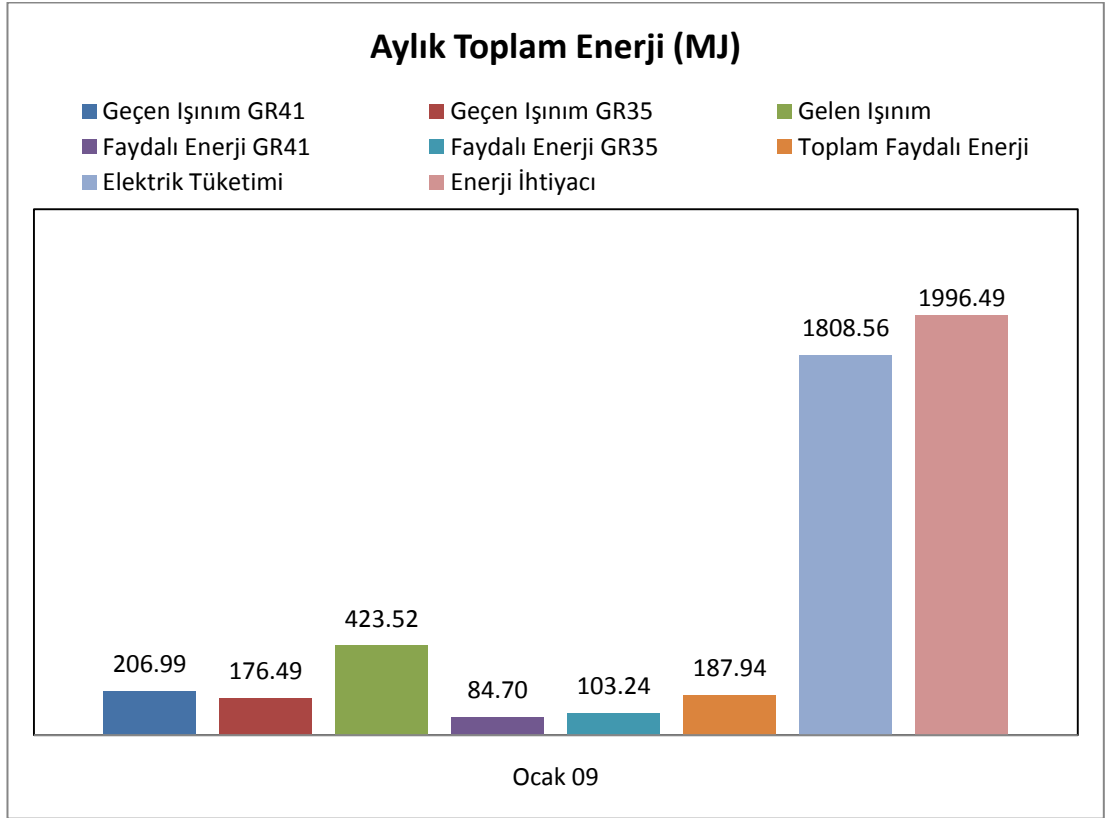
Şekil 4.13'te, GR41 bölmesinden odaya aktarılan faydalı enerji miktarının diğer bölmeye göre daha az olduğu görülmektedir. Şekil 4.12'de görüldüğü üzere, ilgili günde GR41 bölmesinden odaya ısı aktarımı saat 11:00'de başlarken, GR35 bölmesinden saat 10:00'da başlamıştır. Şekil 4.10 ve 11'den görüldüğü üzere GR41 tarafının fanı yaklaşık 1 saat gecikmeli olarak açılmakta fakat her ikisi de aynı saatte kapanmaktadır. Bunun nedeni daha yüksek sıcaklıkta enerji depolamak olarak açıklanabilir. Sıvapanların ön yüzey (güneşe bakan yüzey) sıcaklıkları, içerdikleri FDM'lerinin ergime sıcaklıklarını geçtiğinde (GR35 tarafı için 35°C, GR41 tarafı için 45°C) dijital termostatlar fanları çalıştırır ve yüzey sıcaklıkları 25°C'ye düştüğünde fanları durdururlar. Sonuç olarak GR41 tarafında ergime sıcaklığına ulaşmak daha uzun zaman alacağı için, fan diğer tarafa göre geç açmakta ve içeri taşınan enerji miktarı daha az olmaktadır. Aslında bu beklenen sonuçtur, çünkü enerji, GR41 tarafında daha yüksek sıcaklıkta depolanmaktadır.

Bu noktada araştırmanın tasarım amaçlarına geri dönüp bir değerlendirme yapmak gereklidir. Araştırmanın hedeflerinden biri, en iyi verimi elde etmek adına, kullanılacak olan FDM'nin faz değişim sıcaklığının belirlenmesiydi ve bu yüzden iki bölmeli güney duvar yapıp, her bölmede farklı faz değişim sıcaklığına sahip FDM'ler kullanıldı. Isıtma tekniği uygulamalarında veriş havası dizayn sıcaklığı 50°C olarak alınır, GR41'i seçmemizin nedeni, veriş havası sıcaklığı için üst limit olarak alabileceğimiz bu değere yaklaşmaktır. Çünkü GR41'in faz değişim sıcaklık aralığı DSC analizi ve üretici firmanın verilerine göre 33-48°C ve ısı füzyon pik sıcaklığı 45°C civarındadır. Bu aralığın altını denemek için ise faz değişim sıcaklık aralığı 22-40°C olan ve ısı füzyon pik sıcaklığı 35°C olan GR35 kullanılmıştır. Bu seçimde ise alt sıcaklık limiti olarak ısıtma tekniğinde kullanılan tipik oda konfor sıcaklığı olan 22°C dikkate alınmıştır.

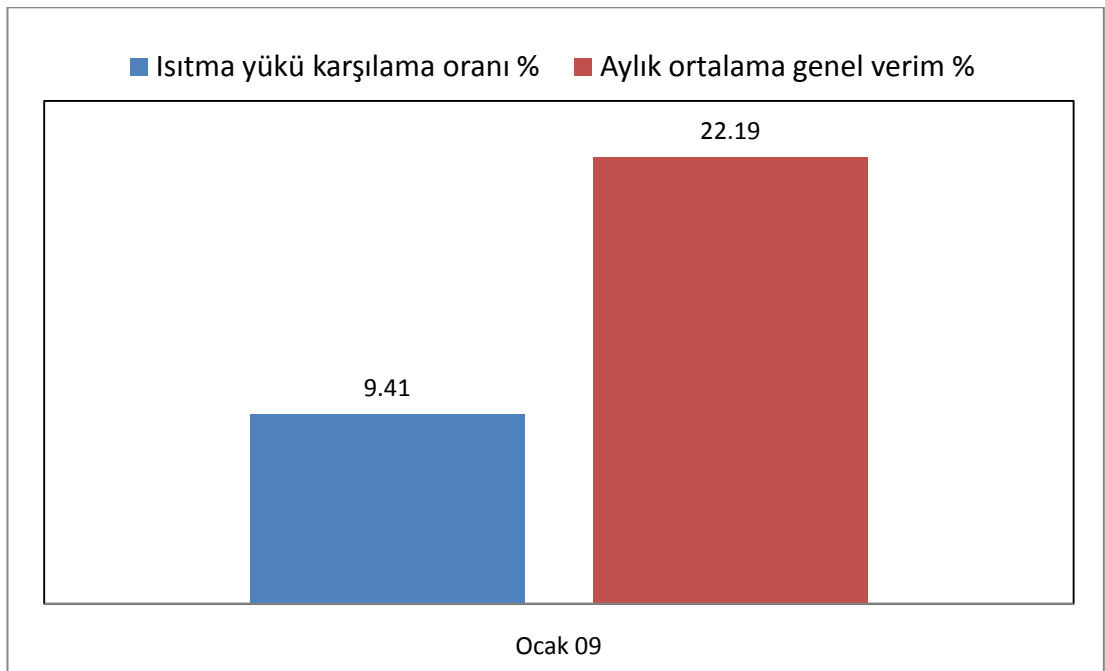
Her iki bölme dikkate alındığında 22-48°C sıcaklık aralığı incelenmiş olmaktadır. Sonuç olarak GR41 bölmesinden daha sıcak veriş havası elde etmeyi hedeflemiştik. Fakat veriş hava sıcaklıkları (bkz. Şekil 4.10, 11) her iki bölme için yaklaşık olarak aynı seyretmektedir. Diğer yandan Şekil 4.13'e göre GR41 tarafından sağlanan günlük enerji miktarı daha azdır. Bu durumda FDM olarak GR35 daha avantajlı görünmektedir. FDM faz değişim sıcaklık aralığı tipik olarak 22-40°C uygun görünmektedir.

4.2. Aylık Analiz

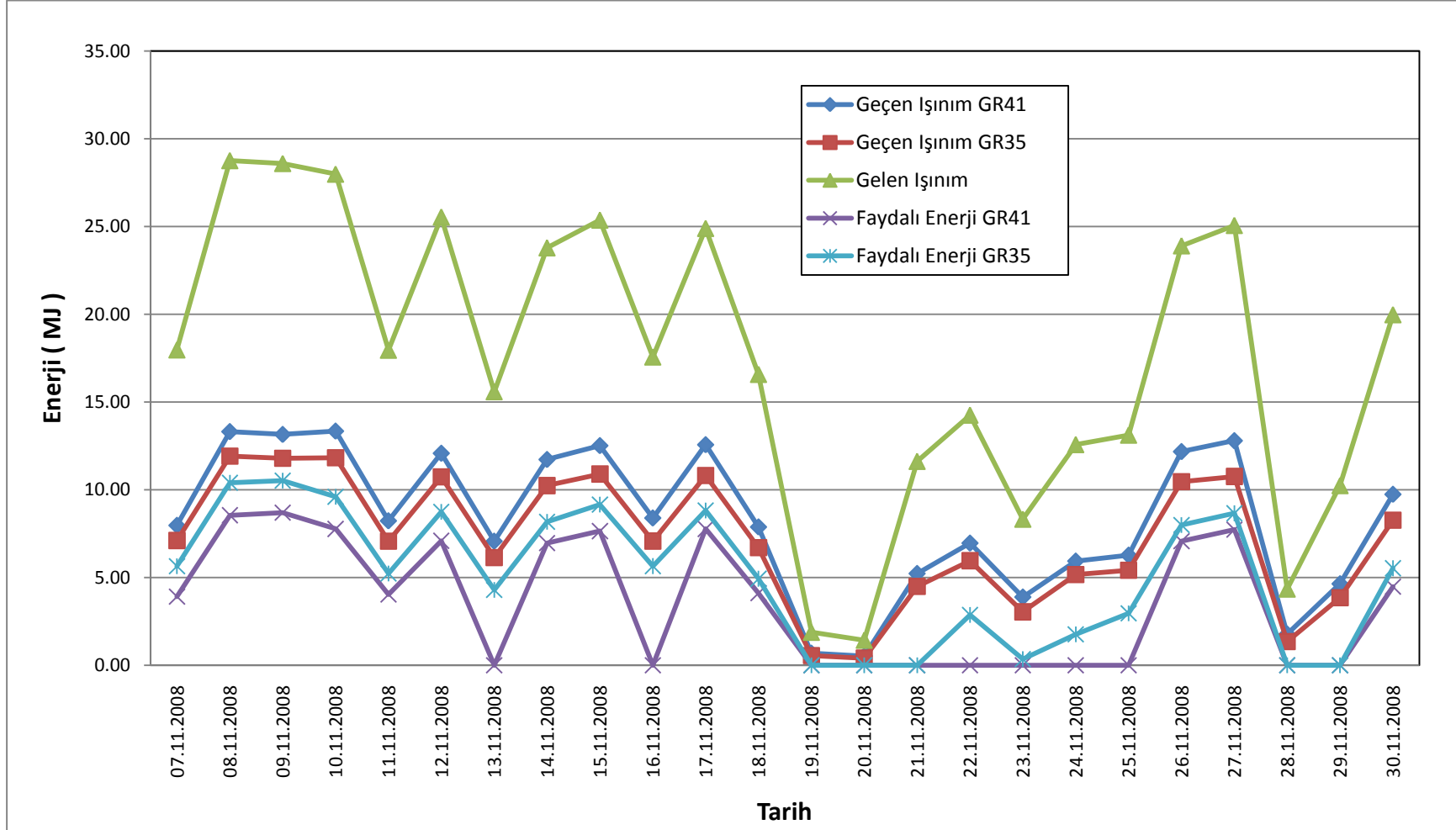
Şekil 4.13'de görülen günlük enerjiler ayın her günü için toplanarak aylık enerji değerleri hesaplanmıştır. Şekil 4.14'de 2009 Ocak ayı için gelen aylık enerjiyi, odaya aktarılan aylık faydalı enerjiyi, elektrikli yağlı radyatörlerin aylık elektrik tüketimini ve faydalı enerji ile elektrik tüketiminin toplamı olan aylık enerji ihtiyacını (ısıtma yükü) görmekteyiz.



Şekil 4.14. Ocak 2009 aylık toplam enerji grafiği

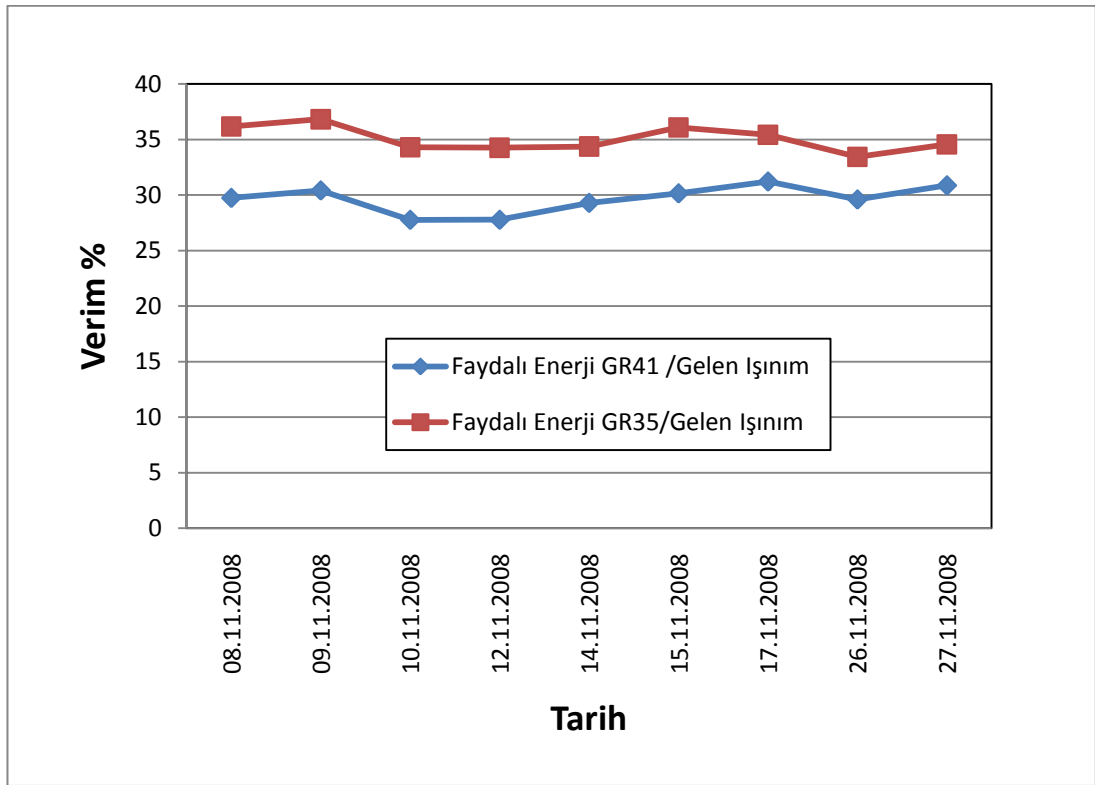


Şekil 4.15. Ocak 2009'a ait aylık ısıtma yükü karşılama oranı ve genel verim grafiği



Şekil 4.16. Kasım 2008'e ait günlük enerji değerleri grafiği

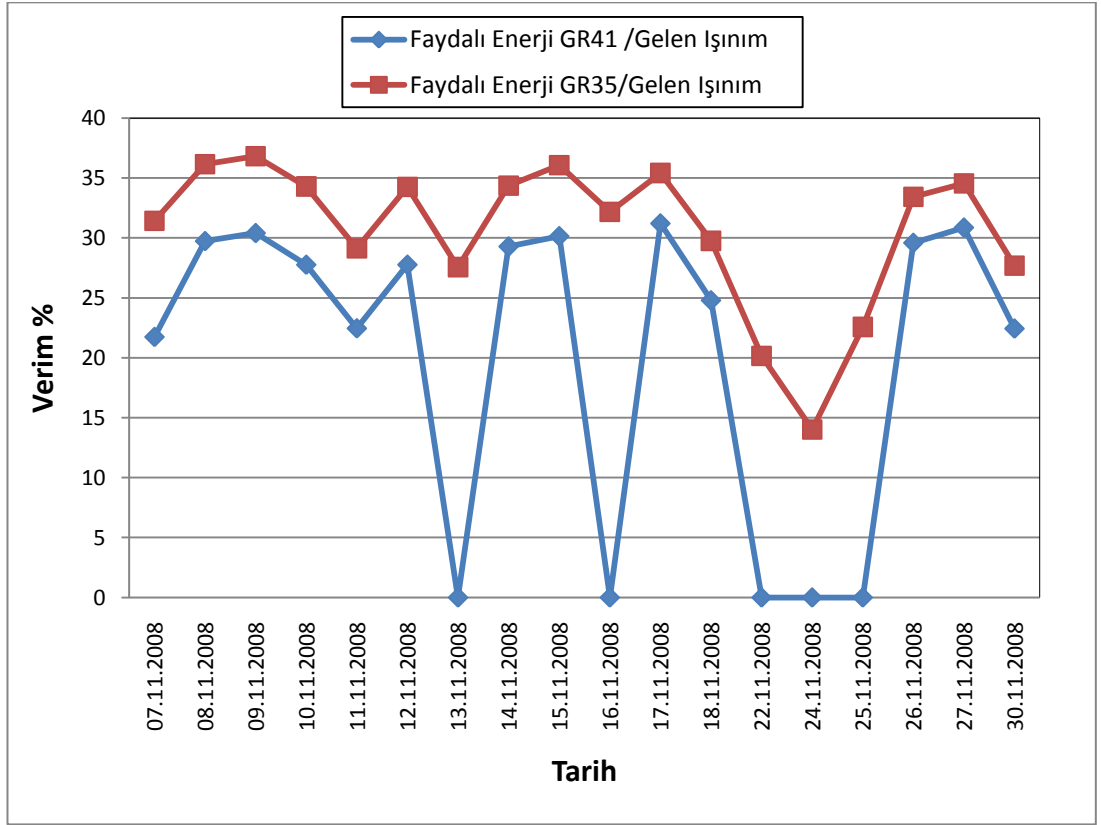
Kolaylık olması açısından faydalı enerjinin enerji ihtiyacına (ısıtma yüküne) oranı olarak hesapladığımız enerji ihtiyacı karşılama oranı Şekil 4.15’de verilmiştir. Görüldüğü üzere Ocak ayında ısıtma yükünün %9,41’i duvar tarafından karşılanmaktadır. Şekil 4.16, ay içerisinde kaç günün kapalı veya açık olduğunu hangi gün ne kadar enerji geldiğini resmeder. Tam açık günler için GR35 bölmesinin genel verimi, %35 civarında değiştiği, GR41 bölmesinin ise %30 civarında olduğu Şekil 4.17’den görülmektedir. Burada genel verim, günlük faydalı enerjinin günlük gelen enerjiye oranı şeklinde hesaplanmıştır.



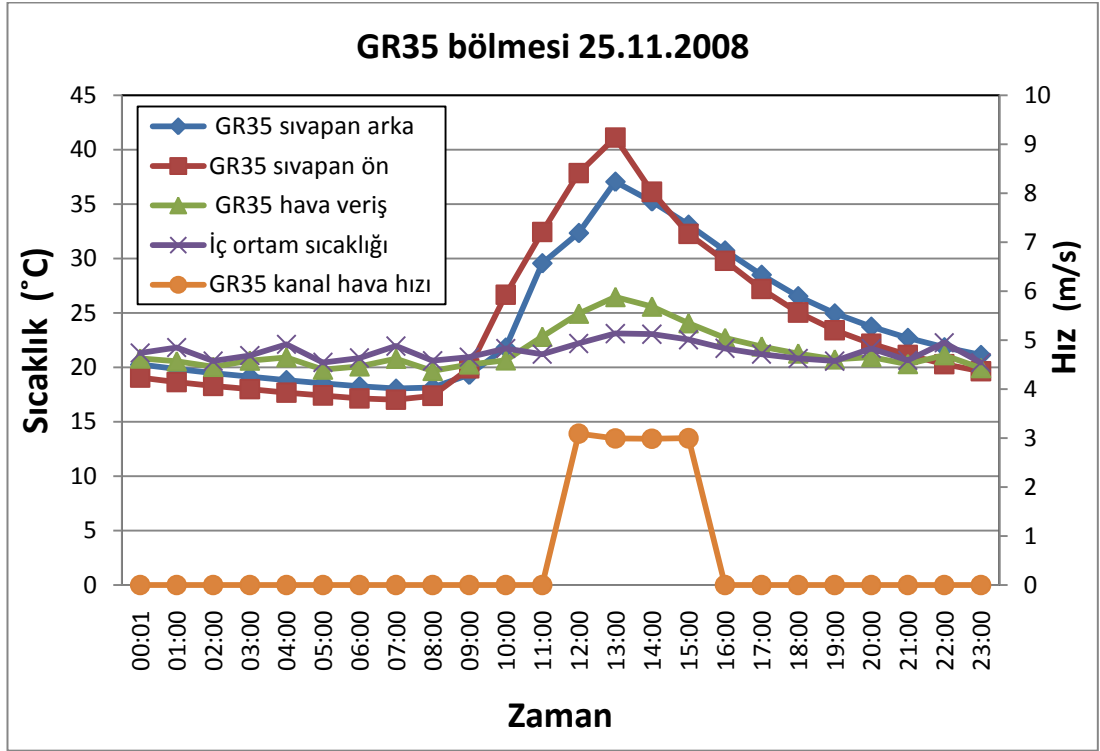
Şekil 4.17. Kasım 2008’in tam açık günleri için genel verim grafiği

Şekil 4.16’ya tekrar geri dönersek, GR35 tarafının faydalı enerji sağladığı 13, 16, 22, 24 ve 25 Kasım 2008 günlerinde GR41 tarafında faydalı enerjinin sıfır olduğu görülmektedir. Bu nedenle GR41 tarafı için genel verim, söz konusu günlerde sıfır olmaktadır (bkz Şekil 4.18).

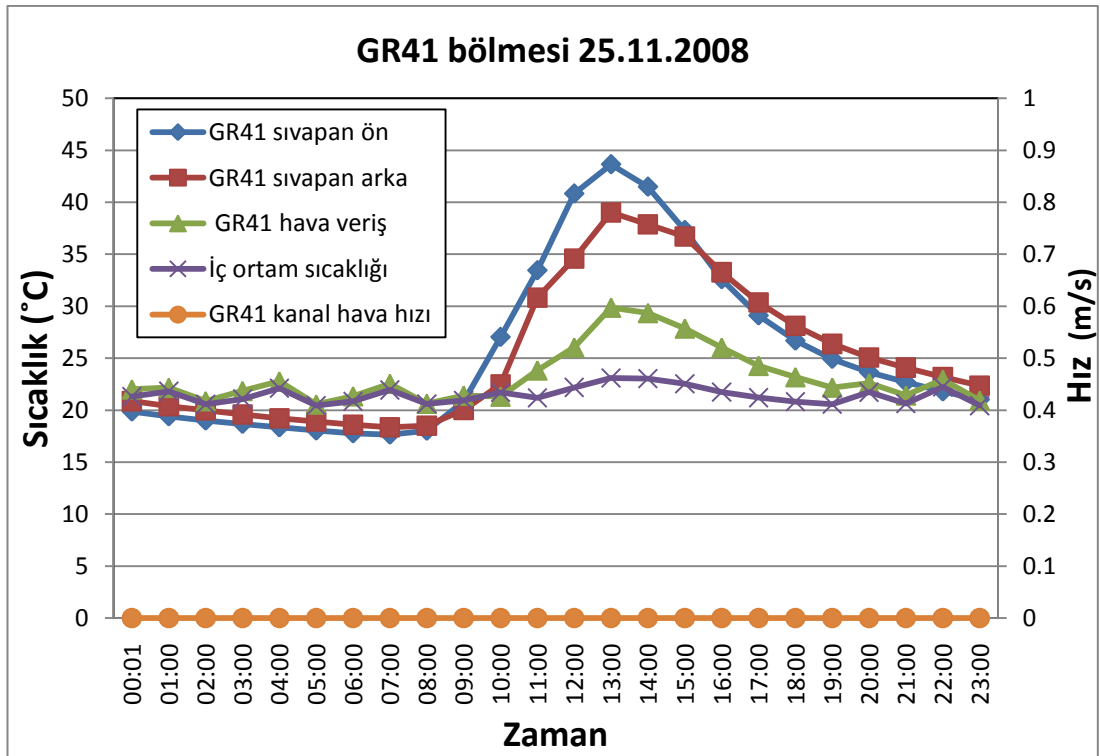
Çünkü GR41 tarafındaki sıvapan yüzey sıcaklığı ilgili günlerde set değerine ulaşmadığından GR41 sirkülasyon fanı açmamış ve sonuç olarak GR41 bölgesinden odaya enerji transferi olmamıştır. Bu çıkarsamanın doğruluğu, örneğin 25 Kasım 2008 için Şekil 4.19 ve 20'den görülebilir. GR41 tarafı için kanaldaki hava hızının sıfır olduğunu, yani fanın açmadığını, çünkü GR41 sıvapan ön yüzeyinde termostat duyargasının ölçtüğü sıcaklık değerleri eğrisinin termostat set değeri olan 45°C'ye ulaşmadığı Şekil 4.20'den görülmektedir. Böylece yukarıda, FDM olarak GR35'in daha avantajlı olduğu yönündeki hüküm, Şekil 4.19 ve 20' ile desteklenmektedir.



Şekil 4.18. Kasım 2008'in kapalı günleri hariç genel verim grafiği



Şekil 4.19. GR35 bölgesi yüzey sıcaklıkları ve kanal hava hızı grafiği



Şekil 4.20. GR41 bölgesi yüzey sıcaklıkları ve kanal hava hızı grafiği

4.3. Yıllık Analiz

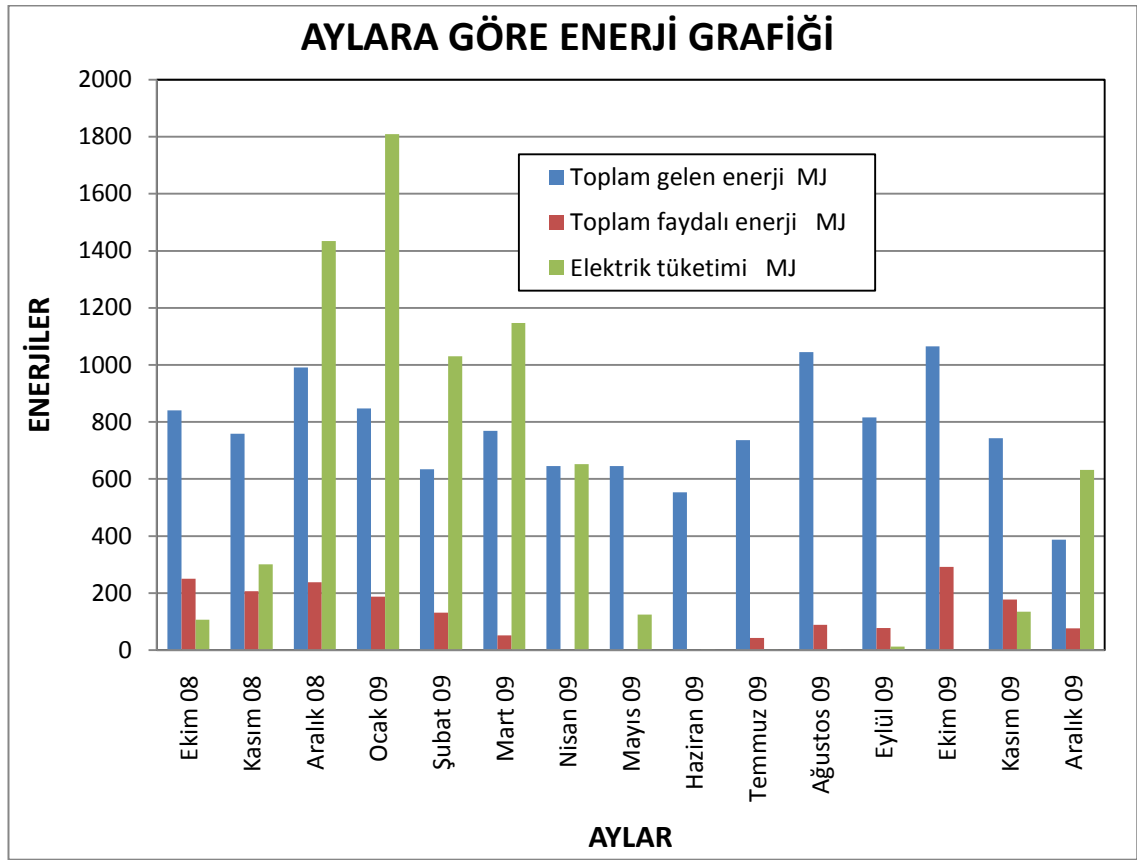
Buraya kadar günlük ve aylık analizlerden örnek sonuçlar verildi. Fakat grafiklerin çokluğu nedeniyle bazı parametrelerin aylara göre nasıl değiştiği üzerinde durmak bütünü görmek açısından daha anlamlı olabilir. Yıllık analizi ısıtma periyodu ve yaz periyodu olarak iki başlık altında incelemek daha sağlıklı olur.

4.3.1. Isıtma periyodu

Şekil 4.21’de her iki bölmeye gelen toplam ışınlam enerjisi, her iki bölmeden elde edilen toplam faydalı enerji ve yağlı radyatörlerin toplam elektrik tüketiminin aylara göre değişimi görülmektedir. Görüldüğü gibi Ekim 2008-Mayıs 2009 ayları arasında ve Kasım 2009-Aralık 2009 aylarında elektrik tüketimi olmuştur. 20°C sıcaklığa ayarlanmış olan termostatlı ısıtıcıların bu periyotta aktif olması, bu periyotta ısıtma ihtiyacının olduğunu ortaya koyar. Isıtma sezonu için 2008 Ekim ayını başlangıç olarak alırsak, 2009 yılının Ekim ayını da ısıtma sezonuna dahil ederek ısıtma periyodunu Ekim 2008-Mayıs 2009 ayları arasında ve Ekim 2009-Aralık 2009 aralığı olarak tayin etmek mümkündür.

Şekil 4.21’den Aralık 2008 ile 2009 yılının Ocak, Şubat, Mart, Nisan ve Aralık ayları gibi soğuk geçen kış aylarında elektrik tüketiminin gelen enerjiden çok daha fazla olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle gelen enerjinin tamamı faydalı enerjiye dönüştürülse bile ısıtma yükünü karşılamayacaktır.

Burada ısıtma yükü elektrik tüketimi ile faydalı enerjinin toplamı olarak tanımlanmaktadır. Şekil 4.21’de verilen enerji bilançosunu doğru bir şekilde yorumlamak için Şekil 4.22, 23 ve Çizelge 4.1’e bakmak gerekir.



Şekil 4.21. Aylara göre enerji grafiği

Bu maksatla Şekil 4.22’de, Denklem 3.8’den hesaplanan ve faydalı enerjinin ısıtma yüküne oranı şeklinde tanımlanan ısıtma yükü karşılama oranı görülmektedir. Buna göre FDM duvar, Ekim 2008 ve Kasım 2008 aylarında sırasıyla ısıtma yükünün %70 ve %40,8’ini karşılarken Aralık 2008, Ocak 2009 ve Şubat 2009 aylarında %10-15’ini karşılamakta ve 2009 yılının Ekim ayında ısıtma yükünün %100’ünü, Kasım ayında %56,8’ini, Aralık ayında ise %10,8’ini karşılamaktadır.

Şekil 4.21’de verilen enerjiler aylık bazda olduğu için, gelen enerji ve faydalı enerji değerleri ilgili aydaki açık ve yarı açık günlerin sayısına bağlıdır. Ekim 2008’den Aralık 2009’a kadar 15 aylık sürede her ay için açık ve kapalı günlerin sayısı Çizelge 4.1’de verilmiştir. Aylık gelen enerji değerlerini tam açık gün sayısı önemli derecede belirlediğinden, ısıtma yükü karşılama oranlarını değerlendirirken ilgili ayın tam açık gün sayısını da dikkate almak gerekir. Örneğin 2009 yılının Şubat ve Aralık aylarında

tam açık günlerin sayısı sadece 2 iken 2008 Aralık ayında 11'dir. Dolayısıyla gerek Şekil 4.21'de verilen enerji bilançosu ve gerekse Şekil 4.22'de verilen karşılama oranlarının sadece deneylerin yapıldığı zaman dilimi için geçerli olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Diğer bir ifadeyle bir sonraki yıl açık ve kapalı gün sayısı farklı olacağı için bu değerler daha farklı olacaktırlar. Bunu 2008 yılı Ekim, Kasım, Aralık aylarını 2009 yılı Ekim, Kasım, Aralık ayları ile karşılaştırmasından açıkça görebiliriz. 2008 yılı Ekim-Kasım-Aralık ayında ısıtma yükü karşılama oranı sırasıyla %70,8-%40,8-%14,2 iken 2009 yılı Ekim-Kasım-Aralık ayında ısıtma yükü karşılama oranı sırasıyla %100-%56,8-%10,8 olmuştur.

Çizelge 4.1. Günlerin durumu

	Tam açık gün sayısı	Kapalı gün sayısı	Yarı açık gün sayısı	Ölçüm yapılan toplam gün sayısı
Ekim-2008	8	6	10	24
Kasım-2008	9	6	9	24
Aralık-2008	11	9	11	31
Ocak-2009	6	13	12	31
Şubat-2009	2	14	12	28
Mart-2009	7	15	9	31
Nisan-2009	6	12	12	30
Mayıs-2009	4	7	20	31
Haziran-2009	6	8	16	30
Temmuz-2009	9	3	18	30
Ağustos-2009	21	2	8	31
Eylül-2009	7	10	12	29
Ekim-2009	14	10	7	31
Kasım-2009	5	13	12	30
Aralık-2009	2	20	8	30

Sonuç olarak Şekil 4.21 ve 22'ye bakarak genel geçer bir çıkarılamada bulunmak hatalı olacaktır. Bunu yapabilmek için uzun yılların ortalamalarına bakmak gerekir.

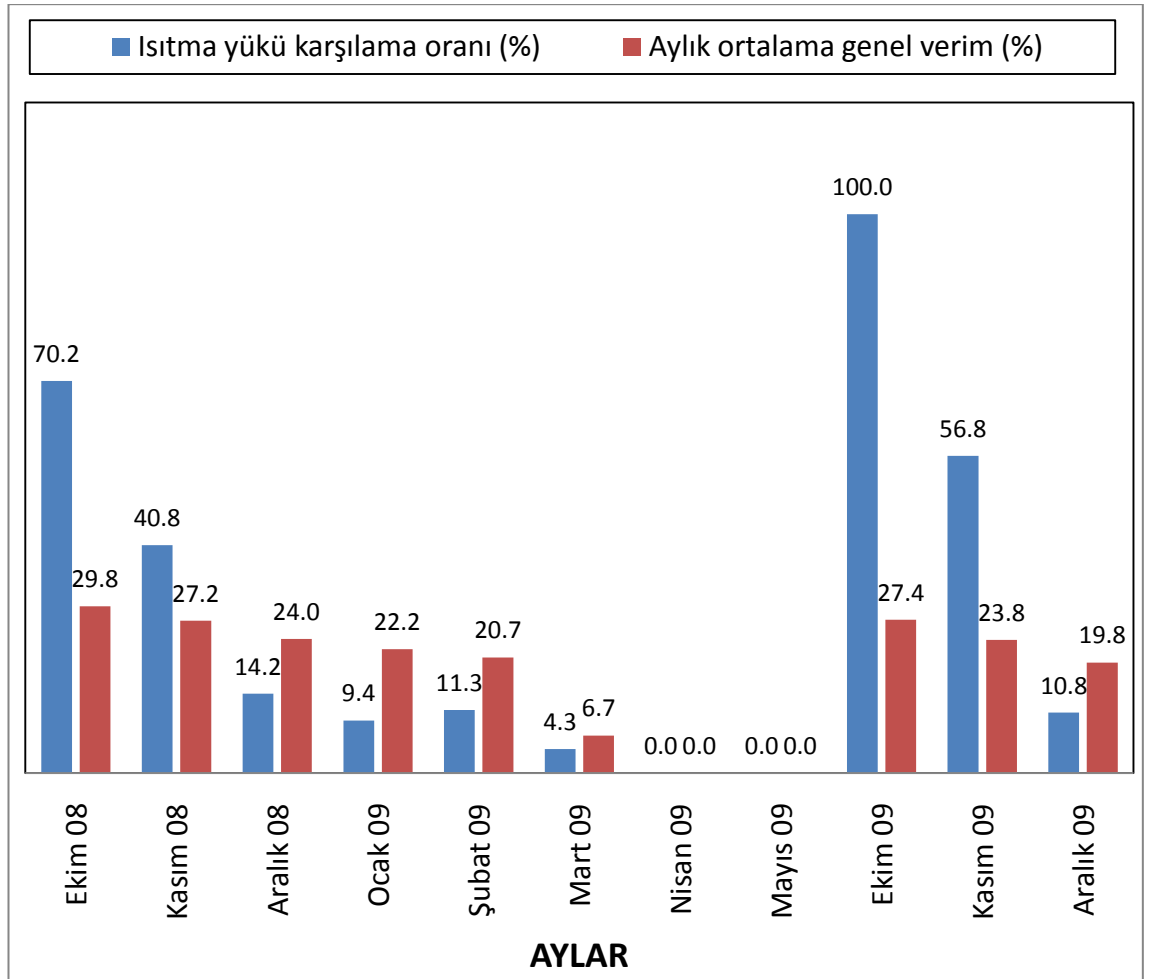
Şekil 4.22’de ayrıca aylık ortalama genel verim değerleri görülmektedir. Bu değerler aylık faydalı enerjinin aylık gelen enerjiye oranı şeklinde hesaplanmıştır. Genel sonuçlar çıkarsama konusunda verim değerleri daha güvenle kullanılabilir. Isıtma periyodu olarak kabul edilen Ekim 2008-Mayıs 2009 ayları arasında ve Ekim 2009-Aralık 2009 aralığında genel verim %29,8-19,8 arasında değişmektedir (Mart-Nisan-Mayıs aylarındaki genel verimi değerleri hariç). Sonuç olarak ısıtma periyodunda gelen enerjinin yaklaşık olarak %20-30’undan faydalanmak mümkündür.

Diğer yandan aylık ortalama genel verim yerine açık bir gün için tanımlanmış genel verime bakmak daha makul değerlendirme sağlar. Şekil 4.23’te her ay için seçilmiş temsili açık günler için günlük genel verim değerleri görülmektedir. Günlük genel verim, denklem (3.7) esas alınarak günlük faydalı enerjinin günlük gelen enerjiye oranlanmasıyla hesaplanmıştır. Şekil 4.23’ten görüldüğü üzere, GR35 bölmesi için, Ekim ve Kasım (2008) aylarında genel verim %35 civarında seyrederken, Aralık(2008), Ocak ve Şubat (2009) aylarında %26 civarında ve 2009’un Ekim-Kasım-Aralık aylarında %28 civarındadır.

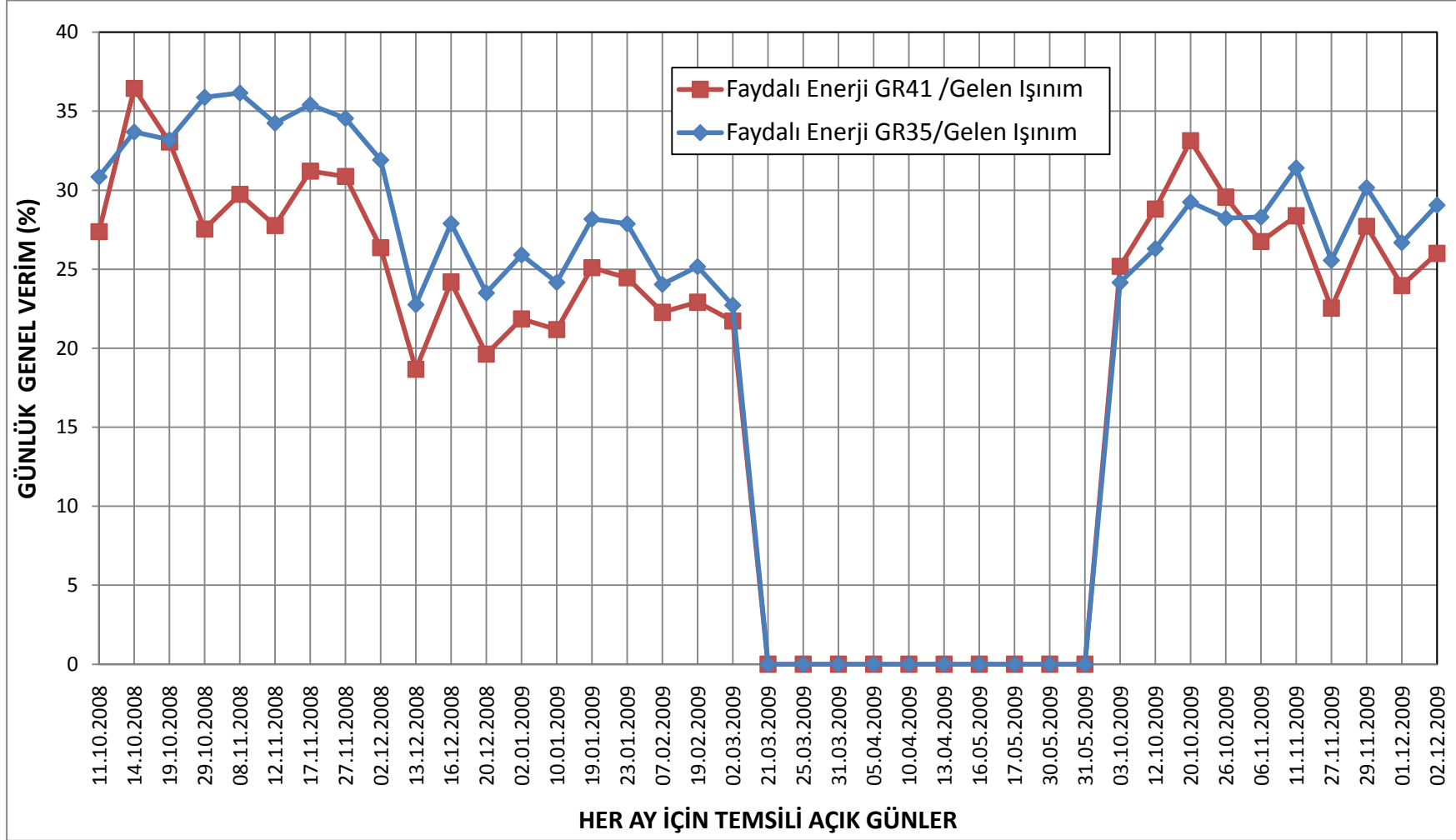
Şekil 4.22’de Mart 2009’da ısıtma yükü karşılama oranı %4,3 ve genel verimin ise %6,7, Nisan ve Mayıs aylarında ise bu iki değer sıfır olması açıklamaya muhtaç ilginç bir sonuçtur. Isıtma yükü karşılama oranı toplam faydalı enerjinin ısıtma yüküne oranı şeklindedir ve Şekil 4.21’den de görülebildiği gibi Nisan-Mayıs aylarında toplam faydalı enerji sıfırdır. Ayrıca genel verimin sadece ısıl verimi değil tanımı gereği optik verimi de içermekte olduğunu hatırlatmak gerekir. Burada optik verimle ışınım geçirme oranı kastedilmektedir.

Şekil 4.24’de yıl boyunca her ayın temsili açık günleri için anlık ışınım geçirme oranları verilmiştir. Burada verilen anlık ışınım geçirme oranları, gün öğlesi civarındaki (11:00-13:00 arasındaki) ortalama değerlerdir. Şekil 4.24’te ışınım geçirme oranının Ekim 2008 ortalarından başlayarak Kasım 2008, Aralık 2008 ve Ocak 2009 sonuna kadar 0,5-0,55 aralığında değiştiği, 2009 Şubat ayında 0,45-0,50 bandına düştüğü görülmektedir. 2009 Mart ayında devam eden düşüşün 21 Mart’tan sonra dramatik bir

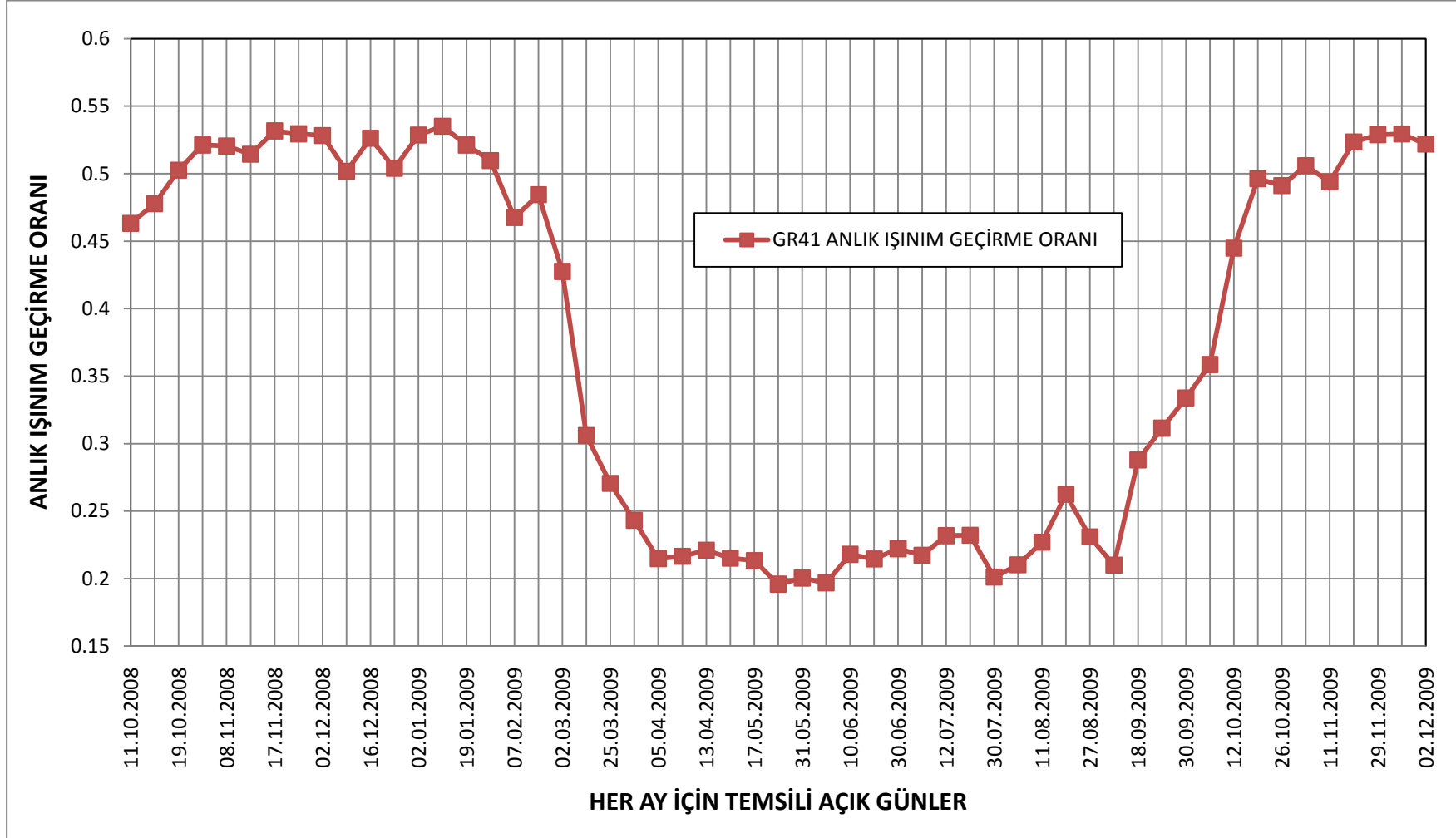
şekilde düştüğü gözlemlenmektedir. Bu tarihten sonra 2009 Eylül ayı başlarına kadarki periyotta anlık ışınlım geçirme oranı ortalama 0,20-0,25 bandından seyretmektedir. Dikkat edilirse düşüş %100 oranındadır. 2009 Eylül ayında ve Ekim ayı başlarında anlık ışınlım geçirme oranının hızla arttığı ve 2009 Kasım-Aralık aylarında 0,5-0,55 aralığında değiştiği görülmektedir. ŞYÜ'nün bu davranışı aşağıda optik analiz kısmında detaylı değerlendirilmiştir. Bu kısa değerlendirmeden sonra Şekil 4.21'e geri dönecek olursak, Nisan'dan itibaren Haziran sonuna kadar, yeterince açık gün olmasına rağmen (bkz.Çizelge 4.1), faydalı enerjinin sıfır olmasının nedeni, ışınlım geçirme oranındaki bu dramatik düşüştür. Bu nedenle Şekil 4.22'de ısıtma yükü karşılama oranı ve genel verim bu periyotta sıfır olmuştur.



Şekil 4.22. Isıtma sezonunda aylara göre ısıtma yükü karşılama oranı ve genel verim grafiği



Şekil 4.23. Isıtma sezonu boyunca her ay için temsili açık günlerdeki günlük genel verim grafiği



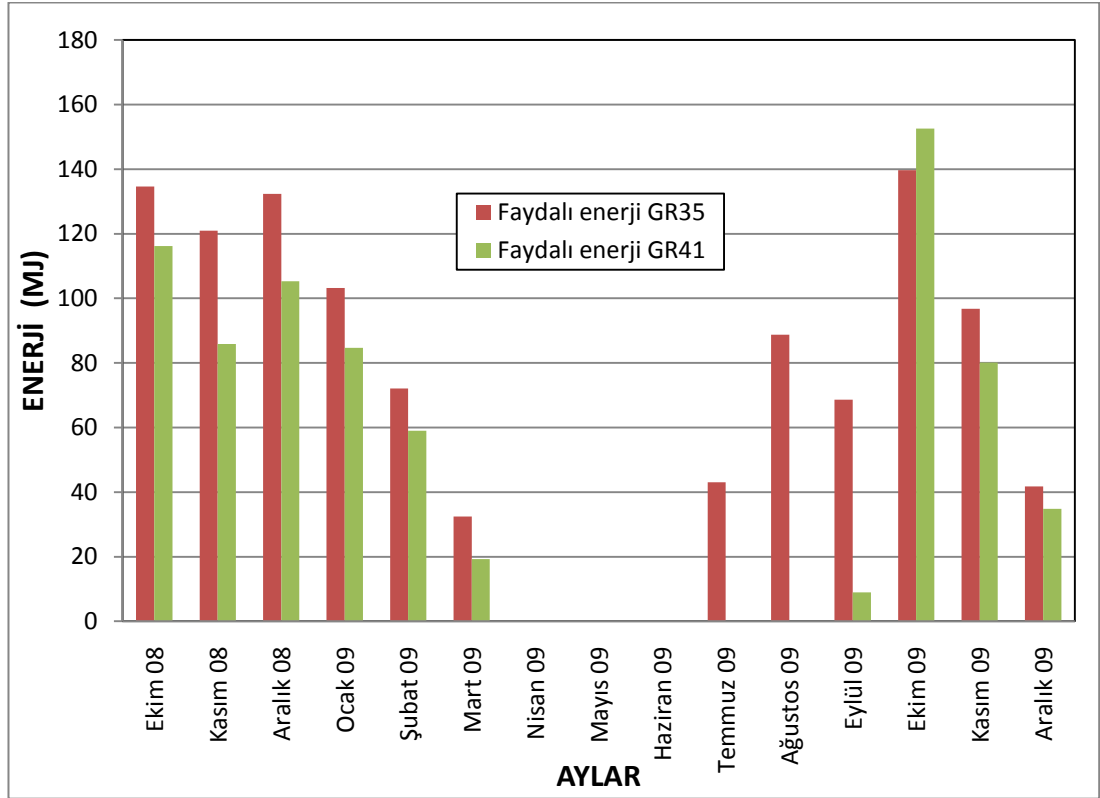
Şekil 4.24. Yıl boyunca her ay için temsili açık günlerdeki anlık işinim geçirme oranı grafiği

4.3.2. Yaz sezonu

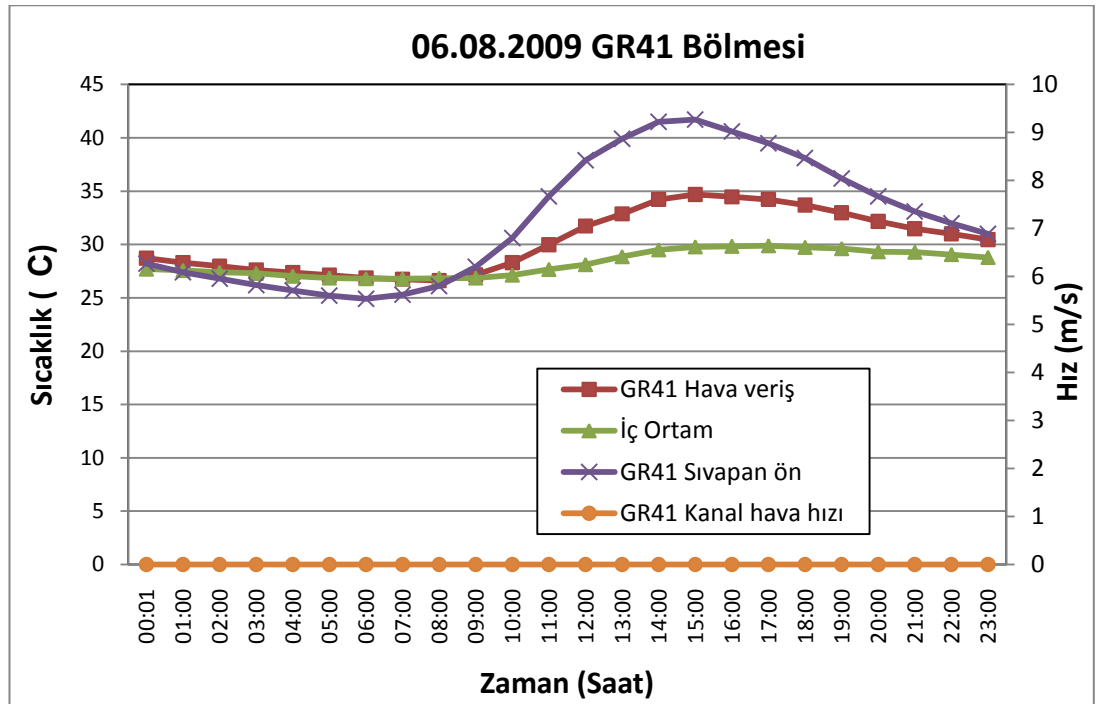
Buraya kadar FDM duvarın ısıtma sezonundaki davranışı değerlendirildi. Şekil 4.21'den 2009 Haziran-Eylül periyodunda elektrik tüketimi olmadığı yani ısıtıcıların devreye girmediği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla bu periyot ısıtma periyodunun dışındadır ve yaz sezonu olarak değerlendirilmelidir. 2009 Haziran-Eylül aylarındaki davranışı incelemek için Şekil 4.21'e tekrar bakmak gerekir. Şekil 4.21'e göre 2009 Nisan-Mayıs aylarında olduğu gibi 2009 Haziran ayında da faydalı enerji değeri sıfırdır. Fakat 2009 Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında azda olsa bir faydalı enerji söz konusudur. Bunun nedeni Şekil 4.25'den anlaşılabilir. Şekil 4.25'te GR35 ve GR41 bölmelerinden sağlanan faydalı enerjinin yıllık değişimi görülmektedir. 2009 Eylül ayındaki küçük miktarı ihmal edersek, GR41 bölmesinden 2009 Haziran-Eylül periyodunda herhangi bir faydalı enerji transferi olmamıştır. Dolayısıyla aslında ŞYÜ'nün yaz aylarında davranışı beklendiği gibidir. Yani duvarın aşırı ısınmasına engel olmuştur.

Diğer yandan GR35 bölmesinden 2009 Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında faydalı enerji transferi söz konusudur. Bu durum ŞYÜ'nün optik performansı ile ilgili değildir. Bu enerji akışının nedeni GR35 tarafındaki termostatın set değerinin düşük olmasındandır. Olayı izah edebilmek için yazın en sıcak bir günde her iki bölmedeki sıcaklıkların nasıl değiştiğine (Şekil 4.26 ve 27'ye) bakmak gerekir.

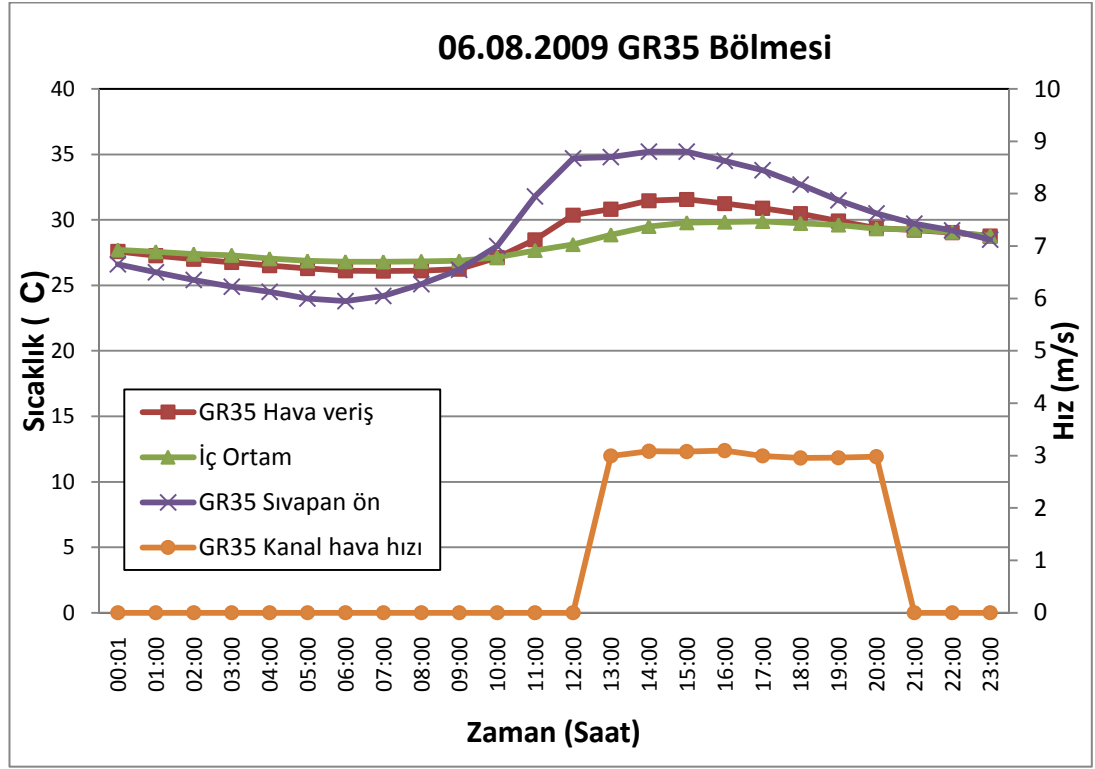
Ayrıca Şekil 4.25 incelendiğinde 2009 yılının Ekim ayı hariç diğer incelenen bütün aylarda GR35 bölmesinin sağladığı faydalı enerji GR41 bölmesinin sağladığı faydalı enerjiden daha büyüktür. Bu durumda FDM olarak GR35 daha avantajlı görünmektedir.



Şekil 4.25. Aylara göre faydalı enerji grafiği



Şekil 4.26. Yazın sıcak bir günde GR41 bölümündeki sıcaklıklar grafiği

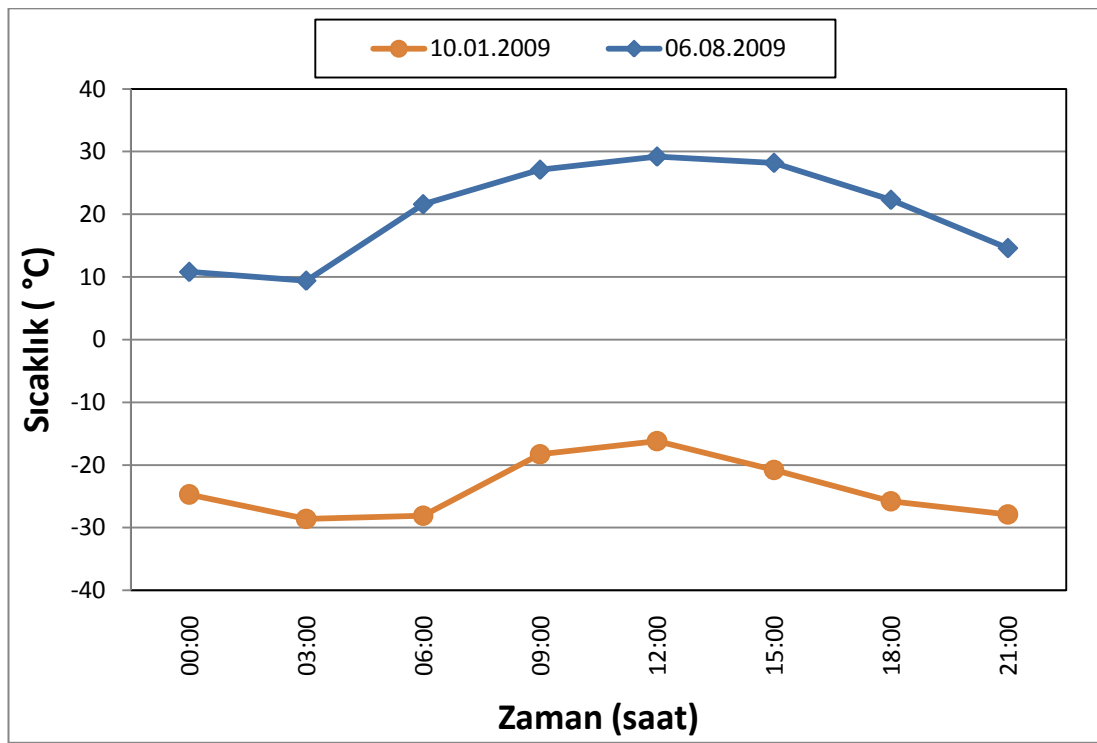


Şekil 4.27. Yazın sıcak bir günde GR35 bölümündeki sıcaklıklar grafiği

Hatırlanacağı gibi GR35 tarafının fanını kontrol eden termostat 35°C 'ye GR41 tarafındaki ise 45°C 'ye set edilmişlerdir. Şekil 4.26'dan görüldüğü gibi GR41 tarafında sıvapan ön yüzey sıcaklığı termostat set değerine ulaşmadığı için bu bölmenin fanı açmamış ve içeriye enerji aktarmamıştır. Fanın açmadığı hız eğrisinin sürekli sıfırda olmasından anlaşılmaktadır. Diğer yandan GR35 bölümünde sıvapan yüzey sıcaklığı set değerine (35°C) ulaştığı için bu bölmenin fanı açmış ve odaya enerji taşımıştır. Bu bölmenin termostatu Mayıs ayından sonra (yaz ayları için) eğer 35°C 'nin birkaç derece üstüne örneğin 40°C 'ye set edilirse, Şekil 4.25'deki GR35 bölümü faydalı enerji değerleri de diğer bölmede olduğu gibi sıfır olur.

Şekil 4.8 ve 4.9'da kış gününde (10 Ocak 2009) GR41 ve GR35 bölmelerindeki sıvapan yüzey sıcaklığı maksimum 53°C 'dir ve o andaki dış sıcaklık ise -16°C civarındadır (bkz. Şekil 4.28). Fakat Şekil 4.26 ve 27'den görüldüğü üzere 6 Ağustos 2009 günü ulaşılan maksimum duvar sıcaklığı GR41 tarafında 42°C , GR35 tarafında ise 35°C ve o

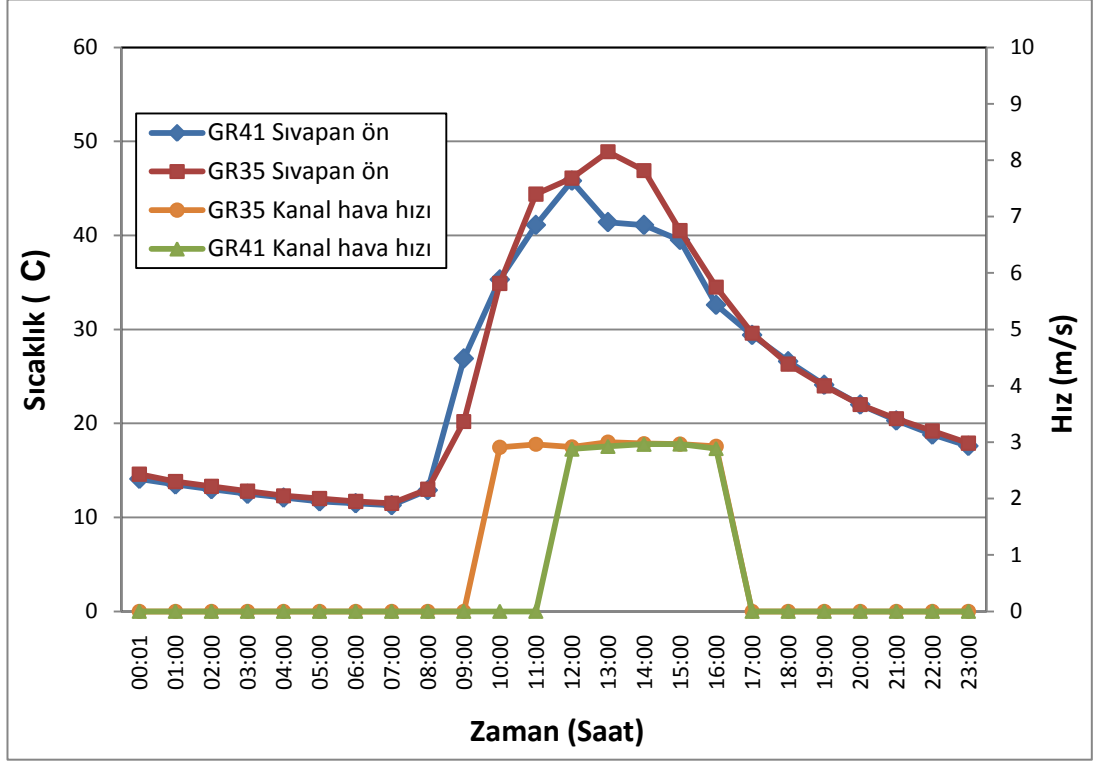
andaki dış sıcaklığın ise yaklaşık 30°C olduğu Şekil 4.28'den görülmektedir. Bu durum göstermektedir ki, ŞYÜ beklenen performansı göstermiş, yazın aşırı ısınmaya engel olarak soğutma yükünün artırmasına mani olmuştur. Yani kış ve yaz güneşini ayırma görevini yerine getirmiştir. Diğer yandan yine Şekil 4.26 ve 27'den görülmektedir ki, sıvapanların sıcaklığı gece 25°C'nin altına düşmektedir. Bu sonuç, yazın en sıcak günde bile FDM'sinin gece boyunca rejenere olabildiğini göstermektedir.



Şekil 4.28. Dış hava sıcaklığı grafiği

Şekil 4.25'den çıkarılacak bir başka sonuç ise yıl boyunca GR35 tarafının sağladığı enerji, GR41 tarafından daha fazladır. Bu sonucu Şekil 4.23'teki verim grafiğinde de görmekteyiz. Şekil 4.23'te ısıtma sezonu boyunca GR35 tarafına ait günlük genel verimin GR41 bölgesinden daha yüksek kaldığı açıkça görülmektedir. Bu durum yüksek sıcaklıkta ısı depolamanın bir sonucudur. Şekil 4.29'da hız grafiklerine bakıldığında 19 Ocak günü GR35 bölgesinin fanının, diğer bölmenin fanından 2 saat önce çalışmaya başladığı görülmektedir. Çünkü GR35 tarafında sıvapan yüzey sıcaklığı

termostat set değerine (35°C) saat 10:00'da, diğer tarafta ise set değerine (45°C) saat 12:00'de ulaşılmıştır. Sonuç olarak daha yüksek sıcaklıkta daha az ısı depolanmaktadır.



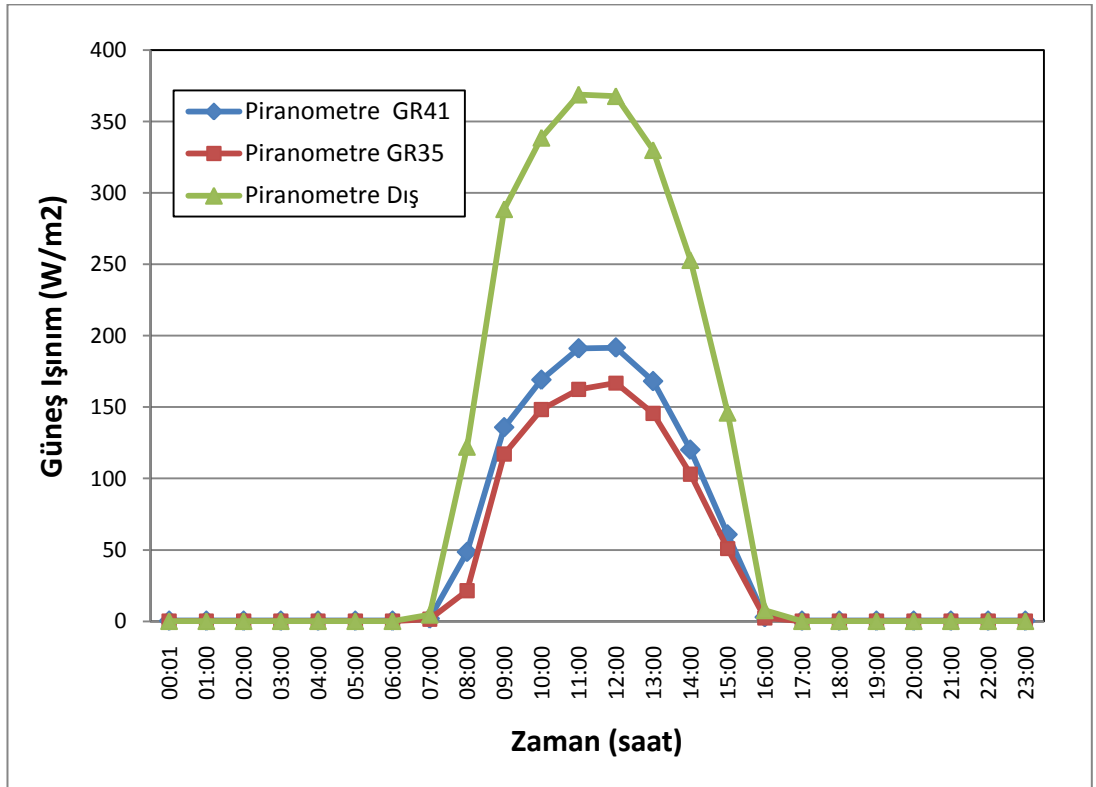
Şekil 4.29. 19 Ocak 2009'a ait değerler

4.4. Optik Analiz

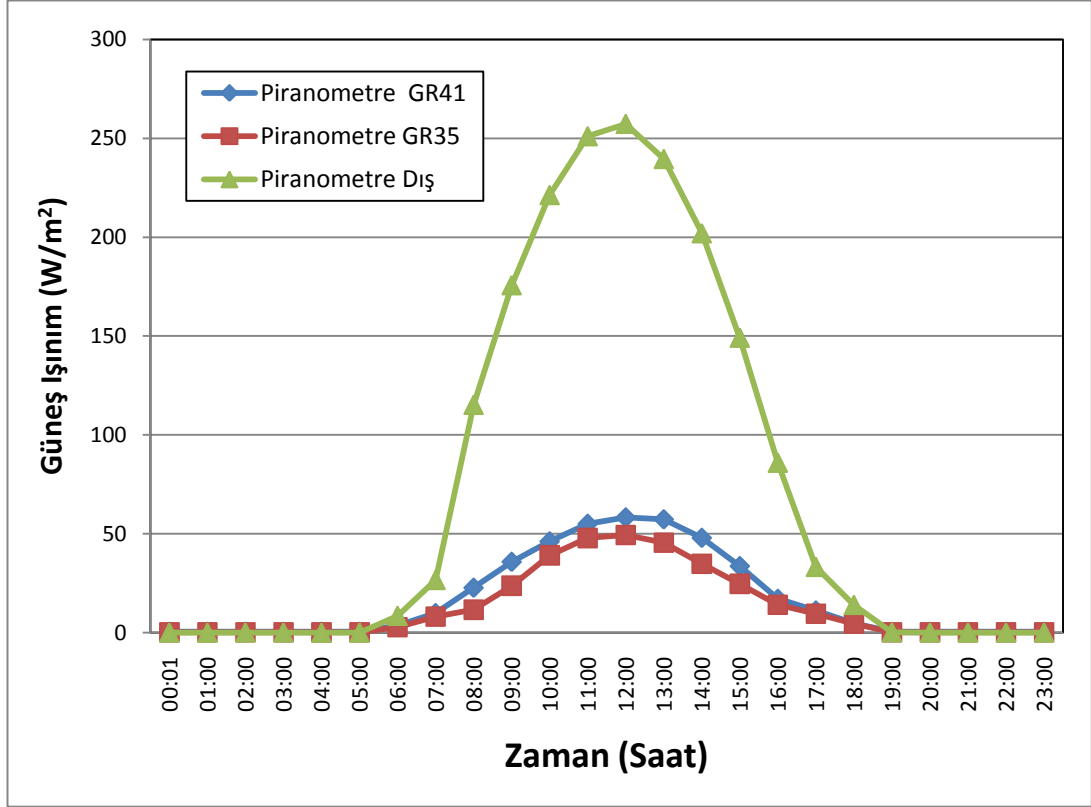
Motivasyon bölümünde de anlatıldığı gibi ŞYÜ'nin iki fonksiyonu yerine getirmesi beklenmektedir; (1) kış aylarında iyi bir ısı yalıtımı sağlayarak FDM katılmış sıvadan dışarıya olan ısı kayıplarını azaltması, (2) kış güneşini maksimum, yaz güneşini ise minimum oranda geçirerek yaz aylarında duvarın ısınmasına engel olması. Bu nedenle, araştırmanın en önemli hedefi olan şeffaf yalıtım ünitesinin optik davranışını diğer ifadeyle ışınım geçirme özelliğini ayrı bir başlık altında ele almak gerekir. Şekil 4.30'da bir kış günü ve Şekil 4.31'de ise bir yaz günü için piranometre eğrileri görülmektedir. Bu iki grafiğe dikkatle baktığımızda ŞYÜ'nin yazın daha az ışınım enerjisi geçirdiğini görmekteyiz. Fakat bunu rakamlarla ifade etmek gerekir.

ŞYÜ'nün ışınım geçirme özelliğini daha iyi anlamak için Denklem 3.1 kullanılarak anlık ışınım geçirme oranı hesaplanmıştır. Bu oran ŞYÜ'den geçen anlık ışınımın gelen ışınımına oranı şeklinde hesaplanmıştır. Örneğin Şekil 4.30'da "piranometre GR35" eğrisine ait verileri "piranometre dış" eğrisine ait verilere oranlayarak anlık ışınım geçirme oranının gün içinde nasıl değiştiği hesaplanmış, 1 kış ve 1 yaz günü için Şekil 4.32'de verilmiştir. Bu grafikten görüldüğü üzere maksimum ışınım geçirme oranı 19 Ocak günü 0,45 iken 24 Ağustos'ta 0,19 civarındadır. ŞYÜ'nin beklenen optik davranışı gerçekleştirdiği görülmektedir.

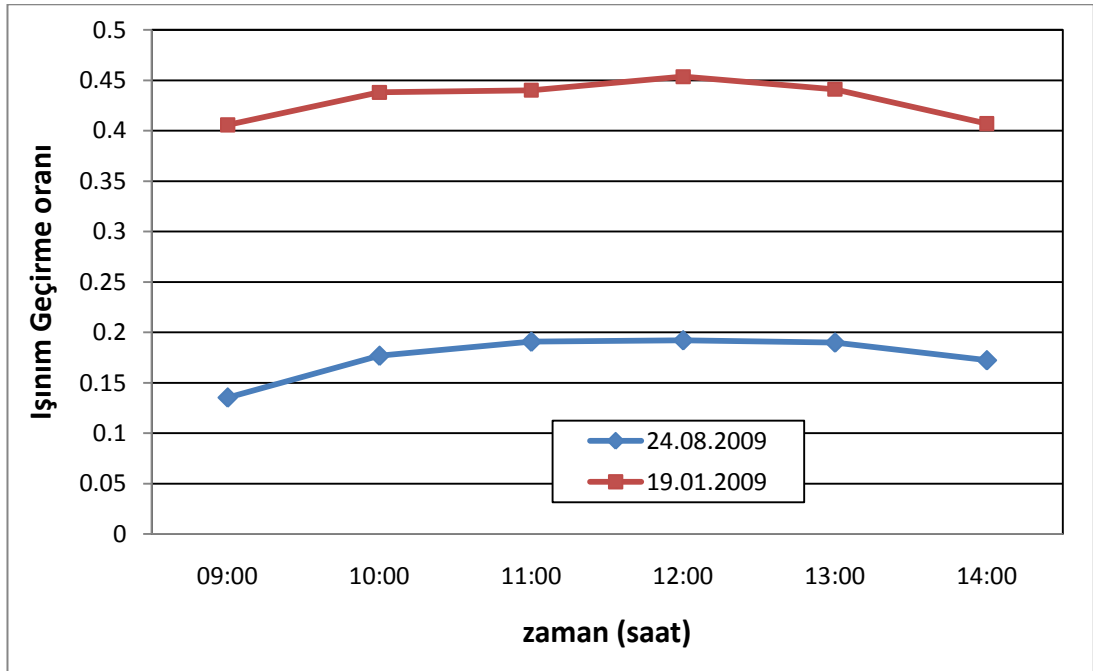
Bu durumu net olarak görmek için anlık ışınım oranının aylık değişimine bakmak gerekir. Şekil 4.33'de anlık ışınım geçirme oranının ay içerisinde nasıl değiştiği görülmektedir. Buradaki anlık ışınım oranları, her gün için öğle saatlerinin (11:00-13:00) ortalaması şeklindedir. Yani her güne ait Şekil 4.32'deki değerlerin öğle civarındaki ortalamasıdır.



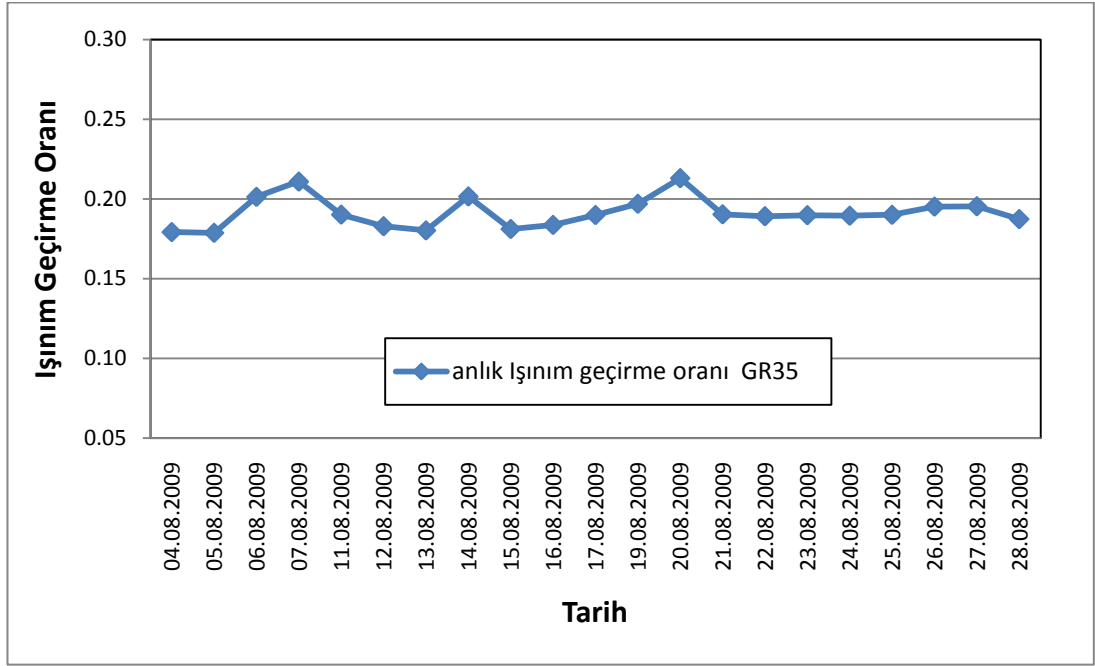
Şekil 4.30. 19 Ocak 2009 gününe ait piranometre grafiği



Şekil 4.31. 24 Ağustos 2009 gününe ait piranometre grafiği



Şekil 4.32. Seçilmiş bir yaz ve bir kış gününe ait GR35 ışınım geçirme oranı grafiği



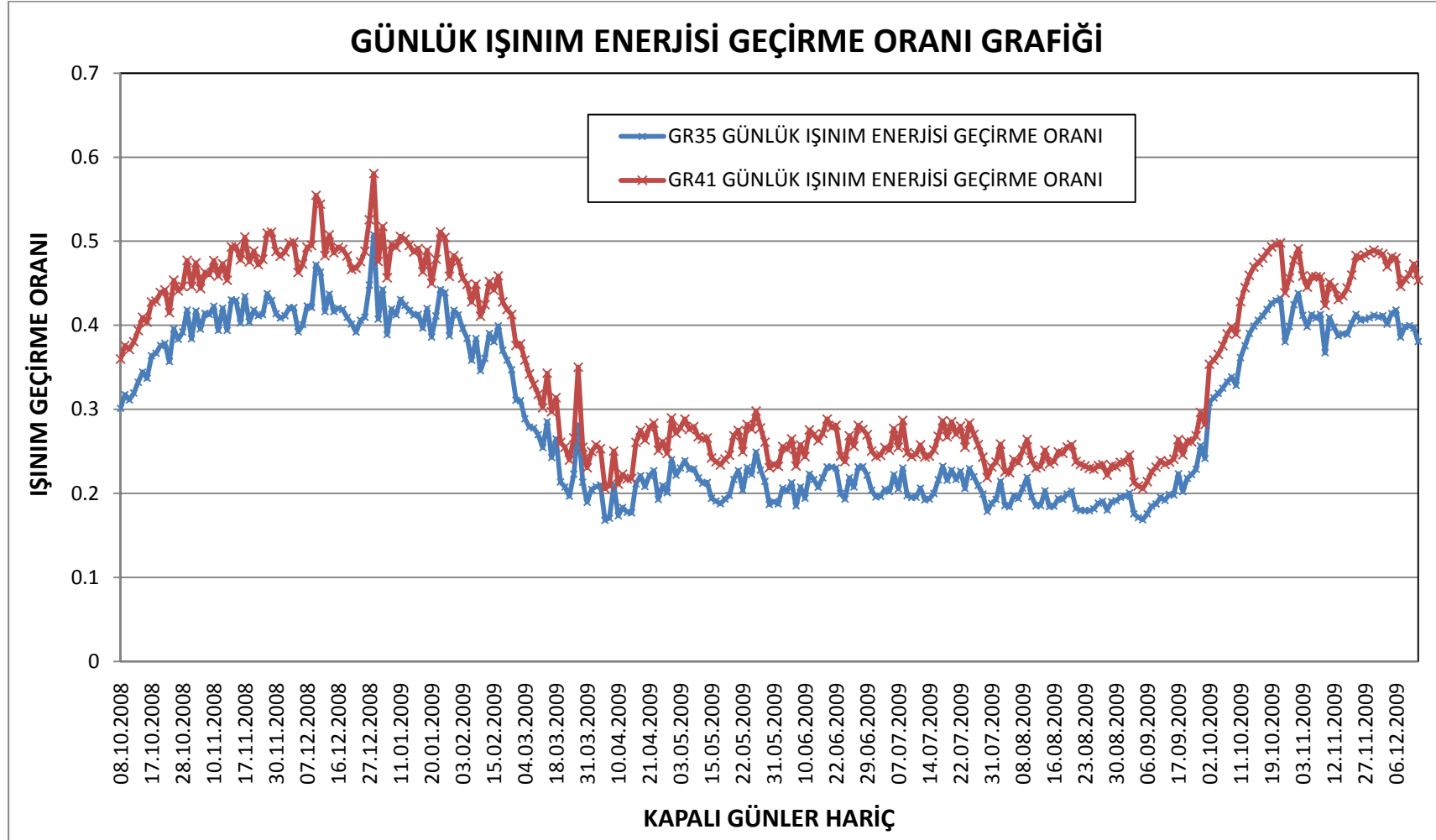
Şekil 4.33. 2009 Ağustos ayına ait tam açık günler için anlık ışınım geçirme oranı grafiği

Işınım geçirme oranının değişimini Şekil 4.24'ten daha net görebiliriz. Enerji perspektifinden bakılarak Şekil 4.24 yukarıda değerlendirilmiştir. Ancak burada başka bir açıdan değerlendirilecektir. Şekil 4.24'teki anlık ışınım geçirme oranları, gün öğlesi civarındaki (11:00-13:00 arasındaki) ortalama değerlerdir. Bu oranlar şeffaf yalıtım ünitesinden (ŞYÜ) geçen anlık ışınım şiddetinin (W/m^2) gelen anlık ışınım oranı şeklinde hesaplanmıştır. Şekil 4.24'ten görüldüğü üzere ışınım geçirme oranının 2008 Ekim ortalarından başlayarak 2008 Kasım, 2008 Aralık ve 2009 Ocak sonuna kadar 0,5-0,55 aralığında değiştiği, 2009 Şubat ayında 0,45-0,50 bandına düştüğü görülmektedir. Mart ayında devam eden düşüşün 21 Mart'tan sonra dramatik bir şekilde düştüğü gözlemlenmektedir. Bu tarihten sonra 2009 Eylül başlarına kadarki periyotta ortalama 0,20-0,25 bandından seyretmektedir. Dikkat edilirse düşüş %100 oranındadır. 2009 Eylül ayında ve Ekim ayı başlarında anlık ışınım geçirme oranının hızla arttığı ve 2009 Kasım-Aralık aylarında 0,50-0,55 aralığında değiştiği görülmektedir. Bu sonuca göre ŞYÜ tasarım amacına uygun bir performans göstermiştir denilebilir. Fakat üzerinde durulması gereken önemli bir nokta söz konusudur. Işınım geçirme oranının 2009 Mart sonu itibariyle minimum değerine düşmesi Erzurum gibi ısıtma sezonu uzun

olan bölgeler için uygun değildir. Erzurum için derece gün sayısı 4856 gün-derecedir. Isıtma sezonu Ekim'den başlar Mayıs sonuna kadar devam eder. Sonuç olarak ŞYÜ mevcut haliyle Erzurum gibi ısıtma sezonunun uzun olduğu bölgelere değil, derece gün sayısının küçük olduğu bölgelere daha uygundur. Örneğin ısıtma gün derecesi Antalya için 1431, İzmir için 1450, Bursa için 2203 ve Kayseri için 3518 derece-gün'dür (Dağsöz 1995). Dolayısıyla Akdeniz, Ege ve Marmara bölgelerinde Şubat veya Mart sonunda ısıtma sezonu sona erer. Bu yüzden ŞYÜ mevcut haliyle bu bölgeler için çok iyi bir performans gösterebilir.

Anlık ışınlam değerlerinden farklı olarak, günlük enerji değerlerinden yararlanıp ışınlam geçirme oranı için günlük ortalama değerler hesaplanmıştır. Yani günlük geçen enerji/günlük gelen enerji şeklinde hesaplanan bu oranın aylara göre dağılımı seçilmiş açık günler için Şekil 4.34'de verilmiştir. Dolayısıyla Şekil 4.34 günlük ortalama ışınlam geçirme oranıdır. Görüldüğü üzere Şekil 4.24 ile benzer bir karakter göstermekle beraber günlük ortalama geçirme oranı, anlık orandan daha düşük olmuştur. Bunun nedeni Şekil 4.32'den görüldüğü üzere öğleden önce ve sonra ışınlam geçirme oranları gün öğlesine göre daha düşük olmasıdır. Şekil 4.34'den de yaz aylarındaki ışınlam geçirme oranının kış aylarındakinin yarısı kadar olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

15 ay boyunca yapılan günlük analizlerde 10 çeşit grafik ($485 \cdot 10 = 4850$ adet) bulunmaktadır. Aylık analizlerde 12 çeşit grafik ($12 \cdot 15 = 180$ adet) ve yıllık analizde 7 çeşit grafik bulunmaktadır. Toplamda 5037 adet grafik mevcuttur. Ayrıca bunlardan farklı grafikler de türetilip kullanılmıştır. Ancak bunların hepsini sayı fazlalığından dolayı tezimde sunamıyorum. Bu yüzden seçilmiş 13 çeşit grafik yılın her ayı için düzenlenmiş ve EK-1' de verilmiştir.



Şekil 4.34. Yıl boyunca kapalı günler hariç günlük ışınlam geçirme oranı grafiği

4.5. FDM İçeren Sıva Levhaları (FDM Sıvapan) İle İlgili Analizler

4.5.1. DSC analiz

Bölüm 3.2’de sıvaya katılan kapsüllenmiş FDM’leri hakkında bilgi verilmişti. Burada bu malzemelerin üretici firma tarafından sağlanan bazı katalog bilgileri ve DSC test sonuçları verilmiştir. Söz konusu DSC testleri, kullandığımız kapsüllenmiş FDM’lerinden numune gönderilerek ODTU merkezi laboratuvarlarında yaptırılmıştır. Bu DSC analiziyle kapsüllenmiş FDM’lerin özgül ısılarının sıcaklıkla değişimi ve ısı füzyon eğrileri elde edilmiştir. GR35 ve GR41 için söz konusu grafikler aşağıda verilmiştir.

Şekil 4.35’de GR35’in ergime bölgesi dışındaki özgül ısı 10°C ’de $1,689 \text{ J/g}^{\circ}\text{C}$ iken 50°C ’den sonra ise $1,459 \text{ J/g}^{\circ}\text{C}$ civarındadır. Özgül ısı değerleri özellikle bir teorik model yaparken çok önemlidir. Çünkü bir faz değişim maddesi ergime sıcaklık aralığı dışındaki sıcaklıklarda duyulur enerji depolar ve özgül ısı, duyulur enerjiyi domine eden önemli bir fiziksel özelliktir. Ergime sıcaklık aralığında ise büyük oranda gizli ısı depolar ve bu durumda faz değişim enerjisi veya ısı füzyon değeri matematik model içinde yer alır. GR35 için ısı füzyon değeri Şekil 4.36’da görülmektedir. GR35 için ergime sıcaklık aralığı grafikten yaklaşık olarak $22\text{-}38^{\circ}\text{C}$ ve bu aralıktaki ısı füzyon değeri yaklaşık olarak 40 J/g olduğu görülmektedir. Maksimum ısı füzyon değeri yaklaşık 34°C civarındadır. Ürün kataloğunda $27^{\circ}\text{C}\text{-}42^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında ısı depolama kapasitesini (ısı füzyon değeri) 45 kJ/kg , ergime sıcaklık aralığını $26^{\circ}\text{C}\text{-}34^{\circ}\text{C}$ ve nominal ergime sıcaklığı ise 29°C olarak verilmektedir (bkz. Çizelge 4.2).

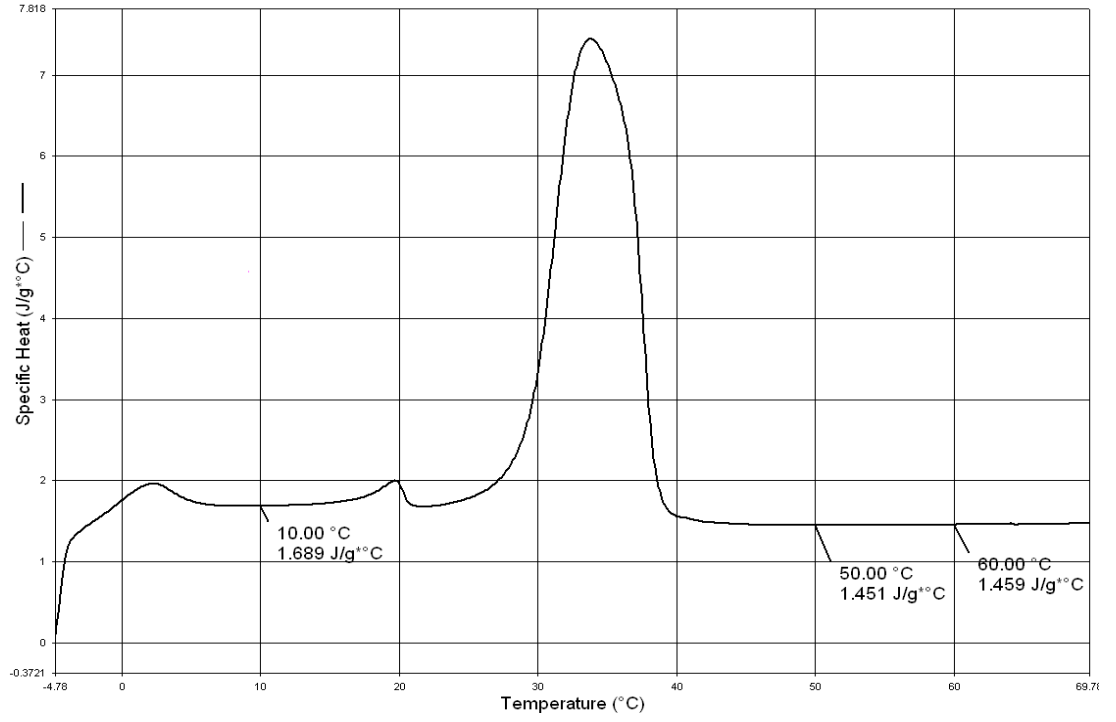
Şekil 4.37 ve 38’de ise GR41 için özgül ısı ve ısı füzyon eğrisi görülmektedir. GR41’in faz değişim aralığı dışındaki bölgelerde özgül ısı $1,3\text{-}1,4 \text{ J/g}^{\circ}\text{C}$ aralığındadır. Faz değişim sıcaklık aralığı yaklaşık olarak $15\text{-}48^{\circ}\text{C}$ olarak görülmekte ve bu aralıktaki ısı füzyon değeri yaklaşık 55 J/g ’dır. Görüldüğü üzere $15^{\circ}\text{C}\text{-}48^{\circ}\text{C}$ aralığında ısı füzyon değeri iki pik yapmaktadır. Bunlardan biri 25°C civarında diğeri ise 45°C civarındadır.

Ürün kataloğunda 33°C-48°C sıcaklık aralığındaki ısı füzyon değeri 64 kJ/kg olarak, nominal ergime sıcaklığı ise 45°C olarak verilmektedir (bkz. Çizelge 4.2).

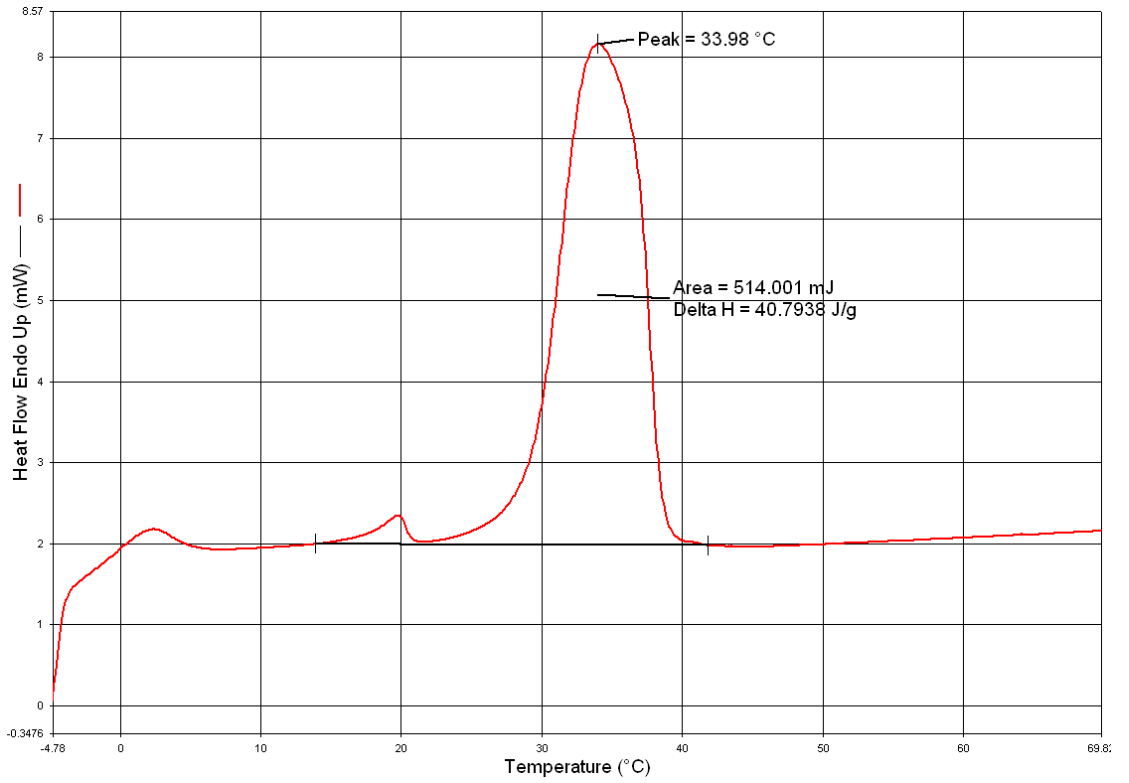
Her iki ürün için firmanın katalog değerleri ile (bkz. Çizelge 4.2) bizim ölçümlerimiz arasında bir miktar farklılıklar olduğunu belirtmek gerekir.

Çizelge 4.2. GR35 ve GR41 için üretici katalog değerleri

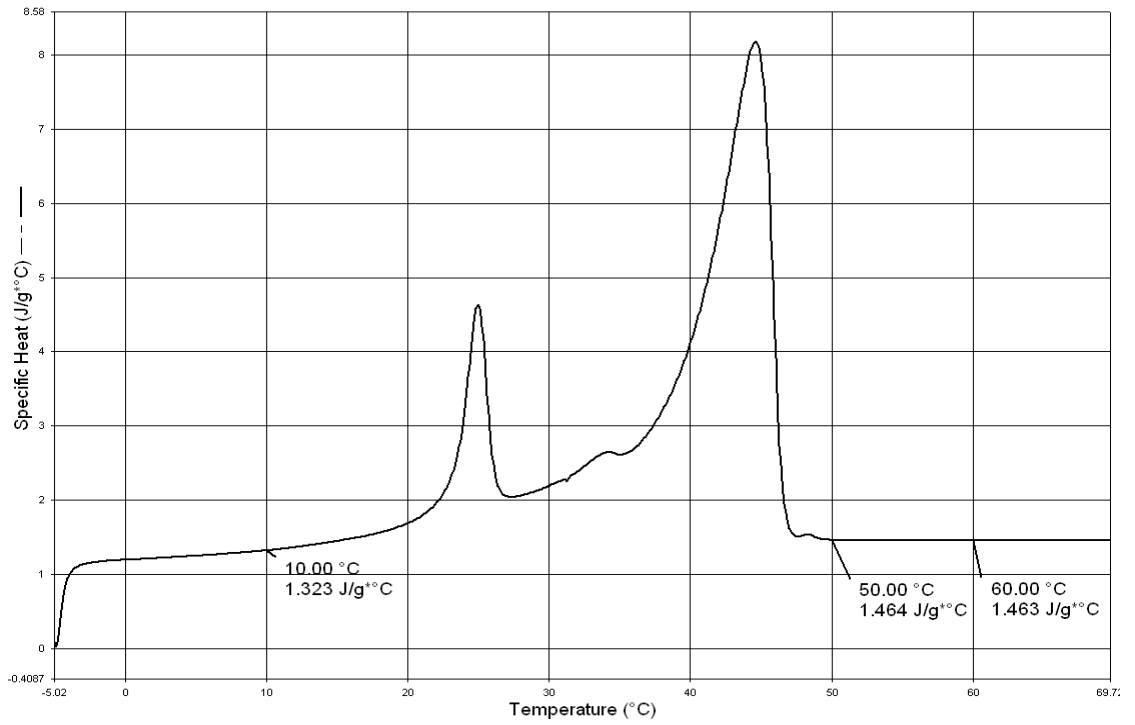
	GR35	GR41
Bileşenler	SiO ₂ , Paraffin	SiO ₂ , Paraffin
Yığın yoğunluğu (kg/l)	0.826	0.75
Nominal Ergime sıcaklığı (FDM) (°C)	29	45
Isı depolama kapasitesi (kJ/kg) (Isı füzyon değeri)	45 (27°C - 42 °C aralığında)	64 (33°C – 48°C aralığında)
Hacimsel genleşme %	yok	yok
Özgül ısı (kJ/kg.K)	1.5	1.5
Isı iletim katsayısı (W/m.K)	0.2	0.2
Flash noktası (FDM) (°C)	180	187
Çalışma sıcaklığı (max.) (°C)	60	70
Korozyon	çoğu malzemeye karşı kimyasal olarak inert	çoğu malzemeye karşı kimyasal olarak inert
Su kirletici özelliği	yok	yok



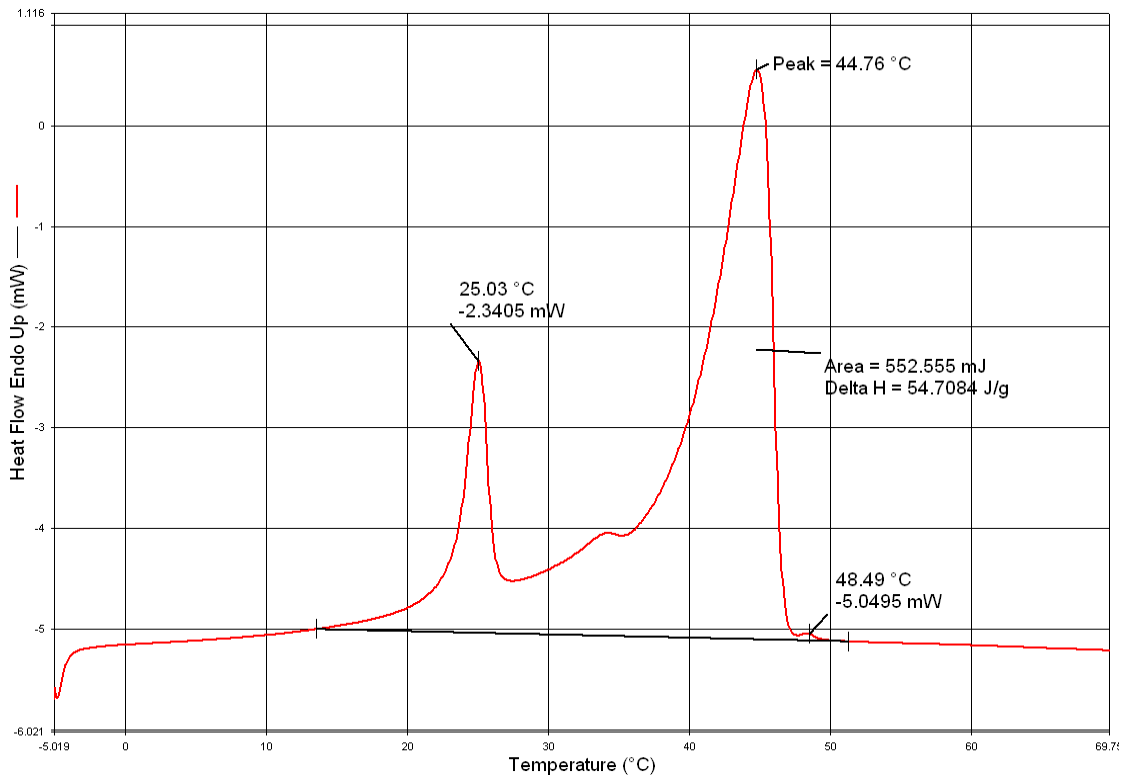
Şekil 4.35. Kapsüllenmiş FDM GR35 için özgül ısı-sıcaklık grafiği



Şekil 4.36. Kapsüllenmiş FDM GR35 için ısı füzyon eğrisi



Şekil 4.37. Kapsüllenmiş FDM GR41 için özgül ısı-sıcaklık grafiği



Şekil 4.38. Kapsüllenmiş FDM GR41 için ısı füzyon eğrisi

prizma numuneleri kullanılmıştır. Numuneler ısı iletkenlik deneyine başlamadan önce $110\pm 10^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki fırında kurutulmuş ve 24 saatlik ölçümler arasında ağırlık kaybı %0,5'i geçmeyecek şekilde ağırlıkları belirlenmiştir. Steiger and Hurd (1978), havanın iletkenliğinin suyunkinden daha düşük olduğunu ve su emmeden dolayı betonun birim ağırlığının %1 artması durumunda, numunelerin ısı iletkenliklerinin %5 arttığını bildirmişlerdir. Bu sebepten dolayı numuneleri nemin etkisinden korunmak için, ısı iletkenlik deneylerinden önce etüv kurusu duruma getirilmişlerdir. Isı iletkenlik ölçümü yapılmadan önce numunelerin yüzeyleri pürüzsüzleştirilmiştir. Isı iletkenlik ölçümleri için ASTM C 1113-90'daki sıcak tel yöntemi esas alınarak, hızlı ısı iletim katsayısı ölçer (QTM 500) cihazı kullanılmıştır (ASTM International 1990). QTM 500 cihazı Kyoto Electronics Manufacturing Co. Ltd. Japonya ürünüdür. Ölçüm aralığı 0,0116-6 W/mK'dır. Ölçüm hassasiyeti okunan değerin referans levhaya göre $\pm 5\%$ 'dir. Gerekli numune boyutu 100x80x40mm veya daha büyük iki parçadır. Ölçüm süresi standart olup 100-120 s'dir. Isı iletkenlik ölçümlerinde bu metodun geniş uygulama alanları vardır (Demirboğa 2003; Demirboğa ve Gül 2003; Demirboğa vd. 2007; Pandey and Sharma 2000; Uysal vd. 2004). Bu yöntem daha eski yöntemlerin aksine sadece birkaç dakika sürmektedir.

Harç numunelerinin 28 günlük kür süresinden sonra küp ve prizma numuneler sırasıyla ASTM C 349-97, ASTM C 348-97'e uygun olarak basınç mukavemeti ve eğilme mukavemeti deneylerine tabi tutulmuştur. Her aşamada üç numune denenmiş ve deney sonucu olarak bunların ortalaması kaydedilmiştir. Eğilme mukavemeti deneyleri için numuneler, basit mesnetlerden 120 mm net mesafede orta açıklıklarından yüklenmiştir. Eğilme mukavemeti deneylerini takiben basınç mukavemeti deneyleri yapılmıştır.

4.5.3. Sıvapanların termofiziksel özellikleri

Bütün karışım gruplarının birim ağırlık değerleri Çizelge 4.4'de verilmiştir. Çizelge 4.4'den görülebileceği gibi, maksimum 28 günlük kuru birim ağırlık, %100 dere kumu ile üretilen kontrol numunelerinden 2238 kg/m^3 olarak elde edilmiştir. En küçük değer 1309 kg/m^3 ile dere kumu yerine % 50 GR41 kullanılan numunelerden elde edilmiştir.

Bütün karışım gruplarının ısı iletim katsayısı değerleri Çizelge 4.4’de verilmiştir. %100 dere kumu ile üretilen kontrol grubunda 2,00 W/mK değeri ile en yüksek ısı iletim katsayısına sahipken, en küçük değer 1,13 W/mK ile %50 GR41 agregalı 28 günlük numuneler üzerinde belirlenmiştir.

Çizelge 4.4. Üretilen harçların bazı ısıl ve mekanik özellikleri

	Kontrol Numune	%33 GR35	%50 GR35	%33 GR41	%50 GR41
Kuru birim ağırlık, kg/m ³	2238	1480	1311	1442	1309
Isı iletim katsayısı, W/mK	2.00	1.45	1.30	1.40	1.134
Basınç dayanımı, MPa	26.80	15.25	11.25	14.89	10.78
Eğilme dayanımı, MPa	4.91	3.38	2.30	3.20	2.44

Çizelge 4.4’de harç örneklerin basınç mukavemetlerinin mineral katkı ilavesine göre değişimi verilmiştir. Dere kumu agregası yerine GR35 ve GR41 kullanımı 28 günde basınç mukavemetinde azalmaya sebep olmuştur. Karışımındaki GR içeriğinin artmasıyla basınç mukavemetindeki kayıplar artmıştır. 28 günlük numuneler için, %33 ve %50 oranında GR35 kullanımı harçların basınç mukavemetini kontrol gruplarına göre sırasıyla %43 ve %58 oranlarında azalmıştır.

Dere kumu yerine GR35 ve GR41 kullanıldığında harç örneklerinin eğilme mukavemetleri de azalmıştır. %33 ve %50 oranlarında GR35 kullanılması durumunda eğilme mukavemetlerinde sırasıyla %31 ve %53 oranlarında azalmalar meydana getirmiştir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Yukarıda detaylı bir şekilde anlatılan FDM Trombe duvarın Ekim-2008'den Aralık-2009 sonuna kadar 15 aylık davranışı incelenmiş, çeşitli analiz ve değerlendirmelerden sonra elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Araştırmanın hedeflerinden biri, en iyi verimi elde etmek adına, kullanılacak olan FDM'nin faz değişim sıcaklığının belirlenmesiydi. Her iki bölme dikkate alındığında FDM faz değişim sıcaklık aralığı 22-48°C olarak incelenmiştir. Sonuç olarak GR41 bölmesinden daha sıcak veriş havası elde etmeyi hedeflemiştik. Fakat veriş hava sıcaklıkları incelenen grafiklerle her iki bölme için yaklaşık olarak aynı seyretmektedir. Ayrıca aylara göre faydalı enerji grafiği incelendiğinde 2009 yılının Ekim ayı hariç diğer incelenen bütün aylarda GR35 bölmesinin sağladığı faydalı enerji GR41 bölmesinin sağladığı faydalı enerjiden daha büyüktür. Bu durumda FDM olarak GR35'in daha avantajlı olduğu görülmektedir.

2. Isıtma periyodu, deneysel sonuçların değerlendirilmesinde önemli bir temel teşkil eder. Erzurum için 2008-2009 ısıtma periyodu, 20°C'ye set edilen termostat kumandalı ısıtıcıların elektrik tüketimi incelenerek Ekim 2008-Mayıs 2009 arası ve 2009 Ekim-Aralık olarak belirlenmiştir. Bu periyot esas alınarak FDM duvarın ısıtma performansı aşağıdaki gibi değerlendirilmektedir.

3. 2008 Aralık, 2009 Ocak, Şubat, Mart ve Aralık aylarında ısıtma yükünün gelen enerjinin tamamından çok daha fazla olduğu, dolayısıyla gelen enerjinin tamamının faydalı enerjiye dönüştürülse bile ısıtma yükünü karşılamayacağı anlaşılmıştır. Fakat bu sonuç açık gün sayısına bağlı olduğu için yıldan yıla değişeceği değerlendirilmiştir.

4. FDM duvarın sağladığı faydalı enerjinin, duvarın arkasında yer alan test odasının ısıtma ihtiyacını karşılama oranı Ekim 2008-Mayıs 2009 ve 2009 Ekim-Aralık ısıtma sezonu için belirlenmiştir. Isıtma yükü karşılama oranı 2008 yılının Ekim, Kasım, Aralık aylarında sırasıyla %70,2, %40,8 ve %14,2, 2009 yılının Ocak, Şubat ve Mart aylarında sırasıyla %9,4, %11,3 ve %4,3 olurken 2009 Nisan ve Mayıs aylarında bu oran % 0,0 ve 2009 yılının Ekim, Kasım, Aralık aylarında sırasıyla %100, %56,8 ve %10,8 olarak belirlenmiştir.

5. GR35 bölmesi için, Ekim ve Kasım (2008) aylarında genel verim %35 civarında seyrederken, Aralık (2008), Ocak ve Şubat (2009) aylarında %26 civarında ve 2009'un Ekim-Kasım-Aralık aylarında %28 civarındadır. GR41 bölmesi için, Ekim ve Kasım (2008) aylarında genel verim %30 civarında seyrederken, Aralık (2008), Ocak ve Şubat (2009) aylarında %22 civarında ve 2009'un Ekim-Kasım-Aralık aylarında %27 civarındadır.

6. GR35 FDM duvarın genel verimi, GR41 FDM duvarın genel veriminden daha büyük olmuştur. Bunun faz değişim sıcaklığı ile ilgili olduğu, bu sıcaklık arttıkça genel verimin düştüğü sonucuna varılmıştır.

7. ŞYÜ'nin anlık ışınlam geçirme oranının Ekim 2008 ortalarından başlayarak Kasım 2008, Aralık 2008 ve Ocak 2009 sonuna kadar 0,5-0,55, 2009 Şubat ayında 0,45-0,50 aralığında değiştiği tespit edilmiştir. 2009 Mart ayında devam eden düşüşün 21 Mart'tan sonra dramatik bir şekilde düştüğü gözlemlenmiştir. Bu tarihten sonra 2009 Eylül ayı başlarına kadarki periyotta anlık ışınlam geçirme oranı ortalama 0,20-0,25 aralığında değişmiştir. Böylece yaz aylarında ışınlam geçirme oranı kış aylarına göre %100 azalmıştır. 2009 Eylül ayında ve Ekim ayı başlarında anlık ışınlam geçirme oranının hızla arttığı ve 2009 Kasım-Aralık aylarında 0,5-0,55 aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. ŞYÜ tasarlanırken kışın maksimum oranda yazın ise minimum oranda ışınlam geçirmesi amaçlanmıştı. Elde edilen sonuçlara göre, ŞYÜ tasarım amacına uygun bir optik performans göstermiştir.

8. 2009 Haziran-Eylül periyodunda elektrik tüketimi olmadığı yani ısıtıcıların devreye girmediği anlaşılmıştır. Dolayısıyla bu periyot ısıtma periyodunun dışındadır ve yaz sezonu olarak değerlendirilmiştir. GR35 ve GR41 bölmelerinden sağlanan faydalı enerjinin yıllık değişimi incelenmiş ve 2009 Eylül ayındaki küçük miktarı ihmal edersek, GR41 bölmesinden 2009 Haziran-Eylül periyodunda herhangi bir faydalı enerji transferi olmadığı görülmüştür. Dolayısıyla aslında ŞYÜ'nün yaz aylarında davranışı beklendiği gibidir. Yani duvarın aşırı ısınmasına engel olmuştur.

9. GR35 bölmesinden 2009 Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında faydalı enerji transferi söz konusudur. Bu durum ŞYÜ'nün optik performansı ile ilgili değildir. Bu enerji akışının nedeni GR35 tarafındaki termostatın set değerinin düşük olmasındandır. Bu bölmenin termostatu Mayıs ayından sonra (yaz ayları için) eğer 35°C'nin birkaç derece üstüne örneğin 40°C'ye set edilirse, GR35 bölmesi faydalı enerji değerlerinin de diğer bölmede olduğu gibi sıfır olacağı kanaatine varılmıştır.

10. ŞYÜ'nün ışıyım geçirme oranının Mart sonu itibariyle minimum değerine düşmesi Erzurum gibi ısıtma sezonu uzun olan bölgeler için uygun değildir. Erzurum için derece gün sayısı 4856 gün-derecedir. Isıtma sezonu Ekim'den başlar Mayıs sonuna kadar devam eder. Sonuç olarak ŞYÜ'nün mevcut haliyle Erzurum gibi ısıtma sezonunun uzun olduğu bölgelere değil, derece gün sayısının küçük olduğu bölgelere daha uygun olacağı düşünülmüştür. Dolayısıyla Akdeniz, Ege ve Marmara bölgelerinde Şubat veya Mart sonunda ısıtma sezonu sona erer. Bu yüzden ŞYÜ mevcut haliyle bu bölgeler için çok iyi bir performans gösterebilir.

11. Karışımdaki GR içeriğinin artmasıyla basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ısı iletim katsayısının azaldığı belirlenmiştir. Sıva mekanik özellikleri kapsül FDM'nin sıvaya katılma oranını sınırlamaktadır. Oysa bu oran birim duvar alanı başına enerji depolama kapasitesini doğrudan etkilemektedir.

12. Kline ve McClintock (Holman 1994) tarafından verilen belirsizlik analiz yöntemi kullanılarak faydalı ısı \dot{Q}_f için deneysel belirsizlik \pm (%12) olarak hesaplanmıştır.

13. Bu çalışma TÜBİTAK Mühendislik Araştırma Grubu tarafından desteklenen 107M154 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiş olup proje sonuç raporu kabul edilmiştir.

14. Tez çalışması süresinde 2 adet uluslararası ve 2 adet Ulusal olmak üzere toplam 4 adet bildiri ile sempozyumlara katılım sağlanmıştır.

➤ Kara, Y.A., Çırakman, (K.)A., Arslantürk, C., 2009. Faz Değişim Maddesi İçeren Şeffaf Yalıtımlı Trombe Duvarı. 17. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 24-27 Haziran 2009, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas.

➤ Kara, Y.A., Çırakman, (K.)A., Çomaklı, K., 2009. Environmental Impact Of Solar Energy Storage In Building Envelope For Passive Solar Heating. Proceedings of the Global Conference on Global Warming-2009, July 5-9, Istanbul, Turkey.

➤ Kara Y.A., Çırakman, (K.)A., Arslantürk, C., 2009. Solar Energy Storage In Building Structure For Solar Space Heating. SET2009 - 8th International Conference on Sustainable Energy Technologies, August 31st to 3rd September 2009, Page 1 of 4, Aachen, Germany.

➤ Kara, Y.A., Türkmen, İ., Çırakman, (K.)A., 2009. Faz Değişim Maddesi Katılmış Duvar Sıvasının Termofiziksel Özellikleri ve Isıl Davranışı. V.Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 16-17 Ekim 2009, Kayseri.

5.2. Öneriler

Elde edilen bu sonuçlar ışığında konuya ilişkin önerilerimiz aşağıda sıralanmıştır.

1. Erzurum iklimi için kapsüllenmiş FDM ergime sıcaklığı 28°C-35°C aralığında olmalıdır.
2. Kapsül FDM'nin ısı füzyon değeri mümkün olduğunca yüksek olmalıdır.
3. Kapsül FDM'nin yapı malzemesine katılma biçimi üzerinde farklı tasarımlar denenmelidir.
4. ŞYÜ mevcut haliyle ısıtma periyodunun kısa olduğu, diğer bir ifadeyle ısıtma sezonunun yaklaşık olarak Mart ayı ortalarında sona erdiği iklimlere daha uygundur.
5. Erzurum iklimi için ısıtım geçirme oranını Mayıs ayı sonuna kadar düşürmeyen yeni bir ŞYÜ tasarımı düşünülmelidir.
6. Uygun bir matematik model oluşturup, güneş verilerinin uzun yıllara dayalı ortalama değerleri kullanılarak ısıtma yükü karşılama oranının aylık değişimi hesaplanmalı ve olayın ekonomik analizi yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Abhat, A., 1983. Low temperature latent heat thermal energy storage materials. *Solar Energy*, 30, 313-332.
- Akgün, M., 2006. Parafinle gizli ısı depolamada depo geometrisi optimizasyonu üzerine deneysel bir çalışma. Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- ASTM C 1113-90, 1990. Test method for thermal conductivity of refractories by hot wire (platinum resistance thermometer technique). ASTM International.
- Bourdeau, L.E., 1980. Study of two passive solar systems containing phase change materials for thermal storage. *Proceedings of fifth national passive solar conference*, Newark, Delaware: American Solar Energy Society; 297–301 October 19–26, Amherst.
- Brumleva, T. D., 1974. Sensible Heat Storage in Liquids. Sandia Laboratories, Energy Report SLL-73-263.
- Chandra, S., Kumar, R., Kaushik, S., Kaul, S., 1985. Thermal performance of a non A/C building with PCCM thermal storage wall. *Energy Convers Manage*, 25(1), 15-20.
- Dağsöz, A.K., 1995. Türkiye' de Derece-Gün Sayıları, Ulusal Enerji Tasarruf Politikası. Yapılarda Isı Yalıtımı, İstanbul.
- Demirboğa, R., 2003. Influence of mineral admixtures on thermal conductivity and compressive strength of mortar. *Energy and Buildings*, 35, 189-192.
- Demirboğa, R., Gül, R., 2003. The effects of expanded perlite aggregate, silica fume, and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*, 33 (5), 723-727.
- Demirboga, R., Turkmen, I., Karakoc, M. B., 2007. Thermo-mechanical properties of concrete containing high-volume mineral admixtures. *Building and Environment* 42, 349–354.
- Dinçer, I., Rosen, M.A., 2002. *Thermal Energy Storage, Systems and applications*. John Wiley&Sons.Chicheser, England.
- Esen, M., Durmuş, A., Durmuş, A., 1999. Güneş Enerjisini Isıl Enerji Olarak Depolama Teknikleri. TMMOB Makine Mühendisleri Odası Bilim Günleri, 5-7 Mayıs, Yayın No:221, sayfa 593-600.
- Farouk, B., Guceri S.I., 1981. Tromb-Michal wall using a phase change material. In *Proceedings of 2nd Miami international conference on alternative energy sources*, Miami Beach, vol 2, 493-502.
- Feldmman, D., Shapiro, M. M., Banu D., 1986. Organic phase change materials for thermal energy storage. *Solar Energy Mater* 13, 1-10.
- Ghoneim, A.A., Kllein S.A., Duffie J.A., 1991. Analysis of collector–storage building walls using phase change materials. *Solar Energy*, 47(1), 237-42.
- Hauer, A., Mehling H., Schossig P., Yamaha M., Cabeza L., Martin V., Setterwall F., 2001. Final Report , Advanced Thermal Energy Storage through Phase Change Materials and Chemical Reactions, Feasibility Studies and Demonstration projects. International Energy Agency Implementing Agreement on Energy Conservation through Energy Storage Annex 17, Canada.
- Holman, J.P., 1994. *Experimental Methods for Engineers* (6th edn). McGraw-Hill:, p.49, Singapore.

- Kaushika, N.D., Sumathy, K., 2003. Solar transparent insulation materials: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 7, 317–351.
- Kenisarin, M., Mahkamov, K., 2007. Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11 (9), 1913-1965.
- Khudhair, A.M., Farid, M.M., 2004. A review on energy conversation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. *Energy Conversion and Management*, vol. 45, 263-275.
- Knowler, T., 1983. Proportioning composites for efficient-TSWs. *Solar Energy* , 31 (3), 319–26.
- Konuklu, Y., 2008. Mikrokapsüllenmiş faz değıştiren maddelerde termal enerji depolama ile binalarda enerji tasarrufu. Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Lane, G.A., 1983. Solar energy latent heat material , Volume I, CRC Pres Inc. 53 Boca Raton /Florida,450.
- Manz, H., Egolf, P.W., Suter, P. and Goetzberger, A., 1997. TIM-PCM external wall system for solar space heating and day lighting. *Solar Energy*, vol. 61 (6), 369-379.
- Mazman, M., 2006. Gizli ısı depolaması ve uygulamaları. Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Özonur, Y., 2004. Düşük sıcaklıkta termal enerji depolamasına uygun faz değıştiren maddelerin mikrokapsüllenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Öztürk, H.H., Başçetinçelik, A., 1999. Güneş enerjisi depolama yöntemlerinin karşılaştırılması. Güneş sempozyumu'99, sempozyum kitabı: 235-242, 25-27 Haziran, Kayseri.
- Paksoy, H.Ö., 1992. Thermal analysis of heat storage materials and integrated heat pump and thermal energy storage. Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Pandey, S.P., Sharma, R.L., 2000. The influence of mineral additives on the strength and porosity of OPC mortar. *Cement Concrete Research* 30, 19-23.
- Pasupathy, A., Velraj, R., Seeniraj, R.V., 2008. Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 39-64.
- Sharma, S.D., Sagara, K., 2005. Latent Heat Storage Materials and Systems:A review. *International Journal of Breen Energy*, 2,1-56.
- Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R., Buddhi, D., 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13 (2), 318-345.
- Steiger, R.W., Hurd, M.K., 1978. Lightweight insulating concrete for floors and roof decks. *Concrete Construction* 23 (7), 411–422.
- Stritih, U., Novak, P., 1996. Solar heat storage wall for building ventilation. In: *World renewable energy congress III, (WREC)*, 268–71, Denver Colorado, USA.
- Stritih, U., Novak P., 2002. Thermal storage of solar energy in the wall for building ventilation, *Advanced Thermal Energy Storage through Phase Change Materials and Chemical Reactions, Feasibility Studies and Demonstration projects*, International Energy Agency Implementing Agreement on Energy Conservation through Energy Storage Annex 17, Ljubljana, Slovenia.

- Swet, C.J., 1980. Phase change storage in passive solar architecture. Proceedings of fifth national passive solar conference, Newark, Delaware: American Solar Energy Society, 282–286, October 19–26, Amherst.
- Tyagi, V.V., Buddhi, D., 2007. PCM thermal storage in buildings : A state of art. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 11 (6), 1146-1166.
- Uysal, H., Demirboğa, R., Şahin, R., Gül, R., 2004. The effects of different cemen dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete. Cement Concrete Research 34, 845-848.
- Weinläder, H., Beck, A., Fricke, J., 2005. PCM - facade - panel for day lighting and room heating. Solar Energy, vol. 78, 177–186.
- Yılmaz, S., 2008. Soğutma uygulamaları için faz değıştiren maddelerde termal enerji depolama. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Zalba, B., Marin, J. M., Cabeza, L. F., Mehling, H., 2003. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. Applied Thermal Engineering, 23, pp. 251- 283.
- [http:// www.fskab.com/annex17](http://www.fskab.com/annex17)
- <http://www.aegisbt.com/>
- <http://www.rubitherm.com/english/index.htm>