



Faz Değişim Malzemeli Fotovoltaik Güç Üretim Sisteminin Sayısal ve Deneysel İncelenmesi

Program Kodu: 3001

Proje No: 315M242

**Proje Yürütücüsü:
Yrd. Doç. Dr. Mehmet Akif EZAN**

Danışman:
Yrd. Doç. Dr. Ahmet YILANCI

Bursiyer:
Ceren YÜKSEL

KASIM 2017
ANKARA



ÖNSÖZ

Güneş enerjisi, sınırsız, temiz ve yenilenebilir bir enerji türüdür. Enerji sorununun giderek arttığı çağımızda güneş enerjisinden faydalanmak amacıyla yeni teknolojiler geliştirilmesi önem arz etmektedir. Fotovoltaik paneller güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çevirebilen temiz bir enerji dönüştürücüdür. Ancak yüksek güneş ışınım değerleri altında fotovoltaik hücre sıcaklığında meydana gelen artış ile elektrik üretim verimliliği düşmektedir.

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenen bu projenin amacı, fotovoltaik panelin gün içerisinde artan hücre sıcaklığını pasif (Faz değişim malzemesi) ve aktif (hava kanalı) ısı kontrol yöntemleri yardımıyla düşürmek ve bu yöntemlerin elektrik üretim verimliliği üzerine etkilerini incelemektir. Bu kapsamda, farklı tip faz değişim malzemeleri fotovoltaik panel pasif ısı kontrolcüsü olarak denenmiştir. Türkiye'nin 7 farklı iklim bölgesi için zamana bağlı yıllık analizler gerçekleştirilmiştir. Aktif kontrolcü olarak ise hava kanalı içeren Fotovoltaik/Termal (PV/T) sistem incelenmiştir. Sistemde akışkan debisi parametrik olarak değiştirilmiş ve debinin bütünlük verime etkisi gözlenmiştir.

Çalışma 315M242 nolu TÜBİTAK 3001 – Başlangıç ARGE projesidir. Vermiş olduğu destekten dolayı TÜBİTAK'a en içten dileklerimizle teşekkürlerimizi sunarız.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
TABLolar LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
1. GİRİŞ	1
1.1 Fotovoltaik Sistemlerin Elektrik Üretim Verimliliği Üzerine Sıcaklığın Etkisi.....	1
1.2 PV Panelin Pasif Isıl Kontrolü.....	1
1.3 PV Panelin Aktif Isıl Kontrolü.....	1
1.4 Projenin Amacı	2
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
2.1 PV/FDM Sistemleri.....	3
2.1.1 Sayısal Çalışmalar.....	3
2.1.2 Deneysel Çalışmalar	3
2.2 PV/T Sistemleri	4
2.2.1 İş Akışkanı Olarak Hava Kullanılan PV/T Sistemleri	4
2.2.2 İş Akışkanı Olarak Su Kullanılan PV/T Sistemleri	5
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	7
3.1 Referans PV Analizleri	7
3.1.1 Problemin Tanımı	7
3.1.2 Korunum Denklemleri	8
3.1.3 Çözüm Yöntemi.....	9
3.2 Etkin Isı İletim Katsayısının Elde Edilmesi.....	9
3.2.1 Problemin Tanımı	9
3.2.2 Çözüm Yöntemi.....	10
3.2.3 Yöntemin Doğrulanması	11

3.3 PV/FDM Matematiksel Modelinin Kurulması	14
3.3.1 Problemin Tanımı	14
3.3.2 Çözüm Yöntemi	14
3.3.3 Yöntemin Doğrulanması	15
3.4 Doğal Taşınımlı PV/FDM Matematiksel Modelinin Kurulması.....	16
3.4.1 Problemin Tanımı ve Çözüm Yöntemi	16
3.4.2 Çözüm Yönteminin Doğrulanması	17
3.5 PV/T ve PV/T/FDM Matematiksel Modellerinin Kurulması	19
3.5.1 Problemin Tanımı ve Çözüm Yöntemi	19
3.6 İller Bazında PV/FDM Sistemine Ait Sonuçların Elde Edilmesi.....	21
3.6.1 Problemin Tanımı ve Çözüm Yöntemi	21
3.7 Ön Deneysel Çalışmalar	23
3.8 PV ve PV/FDM Test Düzeneği Tasarımı ve İmalatı.....	24
4 BULGULAR	26
4.1 Referans PV Analizleri	26
4.1.1 Sabit Güneş Işınımı Analizleri.....	26
4.1.2 Değişken Dış Ortam Koşulları Analizleri	27
4.2 Etkin Isı İletim Katsayısının Elde Edilmesi.....	30
4.3 PV/FDM Sistemi Analizleri	33
4.4 Doğal Taşınımlı PV/FDM Sistemi Analizleri.....	40
4.4.1 Sabit Güneş Işınımı Analizleri.....	40
4.4.2 Zamana Bağlı Analizler	44
4.5 PV/T ve PV/T/FDM Sistemlerinin Analizleri	46
4.5.1 Sürekli Rejim Analizleri	46
4.5.2 Zamana Bağlı Analizler	49
4.6 İller Bazında PV/FDM Sisteminin Analizleri	57
4.6.1 Referans PV Analizleri.....	57
4.6.2 PV/FDM Sistemi	59
4.7 Deneysel Çalışmalar	65



5. TARTIŞMA/SONUÇ	69
KAYNAKÇA.....	71



TABLULAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Farklı PV teknolojileri için sıcaklık katsayıları (Browne vd., 2015)	1
Tablo 3.1. Malzemelerin termofiziksel özellikleri (Cellura vd., 2008)	7
Tablo 3.2. Farklı Rayleigh sayıları için Nusselt sayıları	13
Tablo 3.3. Kullanılan FDM'lere ait ısıl özellikler (Rubitherm GmbH).....	14
Tablo 3.4. Galyum'un termofiziksel özellikleri (Brent vd., 1988).....	17
Tablo 3.5. Malzemelere ait termofiziksel özellikler	20
Tablo 4.1. Sürekli Rejim Panel Verimleri	27
Tablo 4.2. Etkin Isı iletim katsayısı analiz parametreleri.....	30
Tablo 4.3. Aylara göre performansı en iyi FDM uygulamaları	40

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Matematiksel model	7
Şekil 3.2. Matematiksel Model	10
Şekil 3.3. Doğal Taşınım Çözümü Doğrulaması – $Ra = 10^4$	12
Şekil 3.4. Doğal Taşınım Çözümü Doğrulaması – $Ra = 10^6$	13
Şekil 3.5. Yarı sonsuz modelde faz değişimi (Özışık, 1993)	15
Şekil 3.6. Faz değişimli ısı iletimi probleminin doğrulanması	16
Şekil 3.7. PV/FDM bütünleşik sistem	17
Şekil 3.8. Katı-sıvı ara-yüzeyinin ilerlemesi.....	19
Şekil 3.9. PV/T ve PV/T/FDM sistemlerinin şematik görünümü.....	20
Şekil 3.10. Seçilen illere ait yıllık maksimum güneş ışınımı değerleri.....	22
Şekil 3.11. Seçilen illere ait yıllık maksimum dış ortam sıcaklığı değerleri	23
Şekil 3.12. Isıl çift yerleşimi	23
Şekil 3.13. Deneysel günlerdeki güneş ışınım şiddetinin ve dış ortam sıcaklığının değişimi ...	24
Şekil 3.14. Deneysel test düzeneği (a) Tasarım (b) İmalat.....	25
Şekil 4.1. PV panelin zamana bağlı sıcaklık ve güç üretimi değişimi.....	26
Şekil 4.2. İzmir iline ait Temmuz ayı aylık ortalama güneş ışınımı, ortam sıcaklığı ve rüzgâr hızı verileri.....	28
Şekil 4.3. İzmir ili için referans PV sıcaklığı ve anlık güç üretimindeki değişim.....	29
Şekil 4.4. İzmir ili aylık maksimum panel sıcaklığı ve verim düşüşü	29
Şekil 4.5. Farklı konfigürasyonlar için eş sıcaklık eğrileri	31
Şekil 4.6. Etkin ısı iletim katsayısının Rayleigh ve görünüm oranına bağlı değişimi.....	32
Şekil 4.7. Nusselt sayısının Rayleigh ve görünüm oranına bağlı değişimi.....	33
Şekil 4.8. Aralık ayı için PV sıcaklığının zamana bağlı değişimi	34
Şekil 4.9. Nisan ayı PV sıcaklığının zamana bağlı değişimi	35
Şekil 4.10. Temmuz ayı PV sıcaklığının zamana bağlı değişimi	36
Şekil 4.11. Ekim ayı PV sıcaklığının zamana bağlı değişimi	37
Şekil 4.12. Maksimum PV sıcaklığının yıllık değişimi	37
Şekil 4.13. İletim ve taşınım etkili faz değişiminin karşılaştırılması.....	42
Şekil 4.14. Sabit 400 W/m^2 güneş ışınımı altında PV/FDM sistemine ait PV sıcaklık değişimi ve güç üretimi.....	43
Şekil 4.15. Sabit 800 W/m^2 güneş ışınımı altında PV/FDM sistemine ait PV sıcaklık değişimi ve güç üretimi.....	44
Şekil 4.16. Değişken güneş ışınımı koşulları altında (İzmir, Temmuz ayı) farklı kalınlıklarda FDM kullanılan PV/FDM sistemi için PV sıcaklığının zamana bağlı değişimi	45
Şekil 4.17. FDM'nin sıvı faz oranının değişimi	46

Şekil 4.18. PV/T sistem veriminin akış hızına ve çalışma koşullarına bağlı değişimi – $k_{eff} = 2k_{hava}$	47
Şekil 4.19. PV/T sistem veriminin akış hızına ve çalışma koşullarına bağlı değişimi – k_{eff} bağıntısı	48
Şekil 4.20. Hava akış süresinin PV/T sistem verimine ve çalışma sıcaklıklarına etkisi – $U_{hava} = 1,5 \text{ m/s}$	51
Şekil 4.21. Hava akış süresinin PV/T sistem verimine ve çalışma sıcaklıklarına etkisi – $U_{hava} = 3,0 \text{ m/s}$	52
Şekil 4.22. Hava akış süresinin PV/T sistem verimine ve çalışma sıcaklıklarına etkisi – $U_{hava} = 5,0 \text{ m/s}$	54
(a) $U_{hava} = 1,5 \text{ m/s}$ (b) $U_{hava} = 3,0 \text{ m/s}$	55
Şekil 4.23. PV/T/FDM sistemi için hava akış hızı ve akış süresinin çalışma sıcaklıklarına etkisi	55
Şekil 4.24. PV/T sistem için akış kontrolcü sistemi sonuçları	56
Şekil 4.26. Farklı iklim bölgeleri için maksimum PV sıcaklığı ve verimdeki maksimum azalma değerleri (a) Ağrı, (b) Bursa, (c) İzmir, (d) Kırşehir, (e) Mersin, (f) Samsun, (g) Şanlıurfa	58
Şekil 4.27. Ağrı ili yıllık PV sıcaklığı değerleri	60
Şekil 4.28. Bursa ili yıllık PV sıcaklığı değerleri	61
Şekil 4.29. İzmir ili yıllık PV sıcaklığı değerleri	61
Şekil 4.30. Kırşehir ili yıllık PV sıcaklığı değerleri	63
Şekil 4.31. Samsun ili yıllık PV sıcaklığı değerleri	63
Şekil 4.32. Şanlıurfa ili yıllık PV sıcaklığı değerleri	64
Şekil 4.33. 6 Nisan 2017- PV sıcaklığı ve güç üretimi sonuçları	66
Şekil 4.34. 7 Nisan 2017- PV sıcaklığı ve güç üretimi sonuçları	67
Şekil 4.35. 4 Temmuz 2017- PV sıcaklığı ve güç üretimi sonuçları	67
Şekil 4.36. 6 Temmuz 2017 - PV sıcaklığı ve güç üretimi sonuçları	68



ÖZET

Fotovoltaik sistemlerde çalışma sıcaklığı arttıkça elektrik üretim verimliliğinin düştüğü bilinen bir gerçektir. Bu projede, güneş ışınımı nedeniyle yüksek sıcaklık değerlerine ulaşan fotovoltaik panelin (PV) pasif (faz değişim malzemesi) ve aktif (hava kanalı) ısı kontrol uygulamaları kullanılarak elektrik üretiminin iyileştirilmesine yönelik çözümlerin araştırılması amaçlanmıştır. Proje kapsamında pasif ve aktif ısı kontrol yöntemleri test edilmiştir. Pasif ısı kontrol yöntemi olarak faz değişim malzemesi (FDM) kullanılmıştır. Aktif yöntem uygulaması olarak ise FDM haznesi içerisine konumlandırılan bir kanal içerisinden zorlanmış hava sirkülasyonu yardımıyla sistemin toplam veriminin iyileştirilmesi planlanmıştır. İlk etapta PV panel ve FDM haznesi içeren bütünlük bir ısı sistem için 1 boyutlu ve zamana bağlı bir matematiksel model kontrol hacimleri yaklaşımı kullanılarak C++ programlama dilinde oluşturulmuştur. PV panel arka yüzeyine farklı kalınlıklarda FDM haznesi yerleştirilmiştir. FDM haznesinin PV'nin güç üretimi üzerine etkisini tespit etmek için İzmir iline ait meteorolojik veriler kullanılarak tüm aylar için 24 saatlik analizler gerçekleştirilmiştir. Böylece PV panelin ve PV/FDM sisteminin gerçek dış ortam koşullarındaki ısı davranışı sayısal olarak modellenmiştir. Oluşturulan sayısal kod kontrollü deneylerle doğrulanmıştır. Daha sonra, FDM haznesi içerisindeki içe doğru ergime prosesi sırasında oluşacak doğal taşınım etkisi araştırılmıştır. Doğal taşınım etkili faz değişimi probleminde, taşınım terimlerinin ayrıklaştırılmasında Power Law şema (Patankar, 1980), hız ve basınç çiftinin çözümünde ise CUT (Consistent-Update-Technique) çözüm algoritması uygulanmıştır. Ayrıştırılmış cebirsel denklem sistemlerinin sayısal olarak çözümlenmesinde SIS (Strongly-Implicit-Solver) matris çözüm algoritması kullanılmıştır. Literatürdeki benzer çalışmalarda FDM sıvı fazı içerisindeki ısı iletim katsayısı sabit olarak kabul edilmektedir. Ancak bu proje kapsamında, değişen sıcaklık farkları ve sıvı bölgesi genişlikleri için etkin ısı iletim katsayısına ait korelasyonlar elde edilmiştir. Böylelikle sıvı faz içerisindeki doğal taşınım hareketliliği çözüm içerisine dahil edilmiştir. Hava kanalı içeren PV/T ve PV/T/FDM sistemlerinin 3 boyutlu sayısal modelleri ise ANSYS-FLUENT CFD çözücüsü kullanılarak geliştirilmiştir. Güneş ışınım şiddetine bağlı olarak FDM'de depolanan ısı miktarı zamanla değişmektedir. Bu sebeple sistemde sürekli hava akışının bulunması verimli bir ısı kontrol mekanizması değildir. Bunun yerine literatürde ilk defa bu proje kapsamında, sıcaklık kontrollü bir hava akış sistemi sayısal olarak modellenmiştir. Ayrıca PV/FDM sisteminin Türkiye'nin farklı iklim kuşaklarına ait verim haritaları çıkarılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik panel ısı kontrolü, Faz değişim malzemesi, Etkin ısı iletim katsayısı, Matematiksel modelleme



ABSTRACT

It is a known fact that the electricity production efficiency decreases as the operating temperature increases in photovoltaic systems. In this project, it is aimed to reduce the temperature of photovoltaic panel with passive (phase change material) and active (air duct) thermal control methods. Passive and active thermal control methods have been tested within the scope of the project. Phase change material (PCM) was used as passive thermal control method. As active thermal control method application, it is planned to improve the total efficiency of the system by forced air circulation through a channel located in the PCM reservoir. In the first place, a 1-dimensional and time-dependent mathematical model for integrated thermal system containing PV panel and PCM reservoir was created in the C++ programming language using control volume approaches. The PCM reservoirs with different thicknesses was placed on the back surface of the PV panel. Analyses were conducted during 24-hour for throughout the year using meteorological data of the Izmir city to determine the effect of PCM on power generation of PV panel. Thus, the thermal behavior of the PV panel and PV/PCM system under real outdoor conditions is modeled numerically. The numerical code is validated by controlled experiments. Then, the effect of natural convection motion during the melting process in the PCM reservoir was investigated. The SUV-CUT (Standard Under relaxation Version of Consistent Update Technique) algorithm is implemented with Power Law scheme to resolve the governing equations iteratively. SIS (Strongly Implicit Solver) algorithm is implemented for the numerical solution of the algebraic equations. In most mathematical models in the literature the thermal conductivity of the liquid PCM is assumed constant. However, effective temperature coefficient correlations have been obtained for varying temperature differences and liquid zone widths within the scope of this project. The natural convection motion in the liquid phase is included in the solution. 3D numerical models of PV/T and PV/T/PCM systems were developed using the ANSYS-Fluent CFD solver. Depending on the solar radiation intensity, the amount of thermal energy stored in the PCM varies over time. Therefore ensuring a continuous air flow as a thermal control mechanism is not efficient. Instead of a continuous flow controller, a temperature-controlled air flow system will be proposed in the project. Also, efficiency maps for different climatic zones in Turkey were established.

Keywords: Photovoltaic thermal management, Phase change material, Effective thermal conductivity, Mathematical modelling

1. GİRİŞ

1.1 Fotovoltaik Sistemlerin Elektrik Üretim Verimliliği Üzerine Sıcaklığın Etkisi

Fosil yakıtlardan enerji eldesinin çevreye zararları göz önüne alındığında, yenilenebilir enerji teknolojileri üzerine yapılan çalışmaların gerekliliği açıkça görülmektedir. Güneş enerjisi limitsiz, temiz ve çevreye zararsız olması nedeniyle en önemli yenilenebilir enerji kaynağıdır. Bu nedenle son yıllarda güneş ışığını direkt olarak elektrik enerjisine çevirebilen fotovoltaik dönüştürücüler doğal kaynakların verimli kullanılması bakımından çok iyi bir seçenek olmaktadır. Yüzey üzerine etkiyen güneş ışınımının yoğunluğuna bağlı olarak PV panellerin çalışma sıcaklıkları 70°C ve üzerine çıkabilmektedir. Çalışma sıcaklığının 25°C üzerinde olması durumunda PV'lerin elektrik üretiminde önemli azalma meydana gelmektedir. Sıcaklık artışı ile elektrik üretim verimi arasındaki ters orantı sıcaklık katsayısı (β) ile tanımlanmaktadır. Farklı tip PV malzemeleri için sıcaklık katsayısı değişmekle birlikte genel olarak PV hücresinin 1°C artışına karşılık elektriksel güç üretiminde yaklaşık %0,2 ila %0,5 arasında azalma meydana gelmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan PV malzemeleri için literatürde sunulan sıcaklık katsayıları ve panellerin referans sıcaklıkları Tablo 1.1'de verilmektedir.

Tablo 1.1. Farklı PV teknolojileri için sıcaklık katsayıları (Browne vd., 2015)

T_{ref} (°C)	η_{ref} (%)	β_{ref} (%)	FVP Teknolojisi
25	16-24	0,0041	Mono-cSi
25	14-18	0,004	Poli-cSi
25	4-10	0,011	a-Si
25	7-12	0,0048	CIS
25	10-11	0,00035	CdTe

1.2 PV Panelin Pasif Isıl Kontrolü

Günümüzde PV panel ısı kontrolünde doğal veya zorlanmış taşınım sistemleri, ısı boruları ve faz değişim malzemeli sistemler kullanılmaktadır. Isıl kontrol uygulamaları pasif ve aktif olarak 2 başlık halinde incelenebilir. Bu yöntemler arasındaki temel fark pasif ısı kontrol yöntemlerinin pompa veya fan gibi herhangi bir ek güce gereksinim duymamasıdır. Pasif ısı kontrol yöntemleri faz değişim malzemesi kullanımı ve paneli arka yüzeyini doğal taşınıma açık olacak şekilde konumlandırmasıdır. Son yıllarda PV panel ısı kontrol yöntemleri içerisinde öne çıkan pasif kontrol uygulaması FDM kullanımıdır. Panel arka yüzeyine yerleştirilen FDM, panelde absorbe edilen atık ısının panelden uzaklaştırılmasını sağlar, aşırı ısınmayı engeller ve elektrik üretim veriminin artmasına yardımcı olur. Bunların yanı sıra gece-gündüz arasındaki ani sıcaklık değişimlerine karşı paneli korur ve panel ömrünün arttırılmasına yardımcı olur.

1.3 PV Panelin Aktif Isıl Kontrolü

PV panel aktif ısı kontrolünde panel yüzeyindeki atık ısı hava veya su gibi akışkanlar yardımıyla yüzeyden uzaklaştırılmaktadır. Panel arkasına değişik geometriler ve kesit



alanlarına sahip tüpler veya akışkan kanalları yerleştirilerek panel yüzeyi ile iş akışkanı arasındaki ısı transferi iyileştirilmektedir. Yüzey ile akışkan arasındaki ısı transferi hızının artırılması amacıyla akışkan hareketi bir fan (veya pompa) aracılığı ile sağlanmaktadır. Bu sistemlerde üretilen gücün bir kısmı fan (veya pompa) gibi elemanların çalıştırılmasına harcanmaktadır. Bu olumsuzluğa rağmen özellikle yüksek güneş ışınımına maruz kalan bölgelerde yüzeyden akışkan ile atılan ısıyla birlikte elektrik üretim veriminde önemli iyileşme sağlanmakta ve bu sayede toplam güç üretimi artmaktadır. Bunun yanı sıra panelden iş akışkanı yardımıyla uzaklaştırılan atık ısı sıcak su temini veya absorpsiyonlu soğutma uygulamaları gibi geri kazanım yöntemleriyle kullanılarak hibrit elektrik ve ısı enerjisi sistemi oluşturulabilir. Bu sistemlere Fotovoltaik/Termal (PV/T) sistemler denilmektedir.

1.4 Projenin Amacı

TÜBİTAK tarafından 3001 projesi olarak 18 ay süreyle desteklenen bu projede, pasif ısı kontrol uygulaması olarak faz değişim malzemesi (FDM), aktif ısı kontrol uygulaması olarak hava kanalı içeren PV panelin zamana bağlı ısı transferi davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Proje kapsamında, panelin ısı davranışını tahmin edebilen sayısal kod C++ ortamında oluşturulmuş ve bu kod kullanılarak farklı FDM ergime sıcaklıklarının ve FDM kütlelerinin PV/FDM sisteminin elektrik üretim performansına etkileri incelenmiştir. Türkiye'nin farklı bölgeleri için PV ve PV/FDM sistemlerinin elektrik üretim verimliliğinin yıl bazında elde edilmesi amaçlanmıştır. Bunun yanı sıra, PV/FDM sisteminde depolanan ısının gün içinde veya gece kullanılmasına yönelik hava kanalı sistemine ait sayısal modelin hazırlanması da projenin amaçları arasındadır. Bu kapsamda, hava kanalı içeren PV/FDM ısı kontrol sisteminin ısı ve elektriksel performansı farklı akış debilerinde parametrik olarak incelenmiştir. Elde edilen sayısal bulgulardan yola çıkılarak oluşturulan PV/FDM sistemi dış ortam koşullarında test edilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Proje rapor dönemi içerisinde gerçekleştirilen bilimsel faaliyetler, öneri metninde sunulan iş planı çerçevesinde detaylı olarak sunulmaktadır.

2.1 PV/FDM Sistemleri

2.1.1 Sayısal Çalışmalar

Smith vd. (2014) 0-50°C arasında ergime sıcaklığına sahip FDM'lerin PV panel soğutma amaçlı kullanımını değişik iklim bölgeleri için sayısal olarak incelemiştir. FDM'li soğutmanın özellikle yüksek ışınım alan bölgeler için oldukça faydalı olduğunu belirtmişlerdir. Buna göre; PV panel güç üretiminde Meksika ve Doğu Afrika'da %6, Orta ve Güney Amerika, Afrika, Arabistan, Güney Asya ve Endonezya'da ise %5 civarında iyileştirme sağlanabilmektedir. Avrupa'da ise bu oran %2 ve %5 aralığında değişmektedir. Mahamadul vd. (2016) Malezya iklim koşulları için fotovoltaik panellerde faz değişim malzemesi kullanımını araştırmıştır. Sayısal analizler ve deneysel araştırmalar sonucunda 0,02 m kalınlığındaki RT35 tip faz değişim malzemesinin panele entegrasyonu ile modül yüzey sıcaklığının 10°C azaltıldığı belirlenmiştir. Stropnik ve Stritih (2016) faz değişim malzemeli fotovoltaik panelin ısı davranışını hem kontrollü deneylerle hem de TRNSYS paket programı yardımıyla sayısal olarak incelemiştir. Fotovoltaik panel tipi CS6P-M, faz değişim malzemesi ise RT28-HC olarak seçilmiştir. Isıl kontrolcü olmayan fotovoltaik panel ile faz değişim malzemesi kullanılan fotovoltaik panelin sıcaklıkları karşılaştırılmıştır. FDM kullanılması durumunda maksimum panel sıcaklığının 35,6°C azaltıldığı tespit edilmiştir. Simülasyon sonucunda ise FDM içeren fotovoltaik panel veriminin Ljubljana şehri için yıllık %7,3 arttığı gözlemlenmiştir. Kibria vd. (2016), bir PV/FDM sisteminin ısı performansını araştırmak için zamana bağlı bir boyutlu matematiksel model geliştirmişlerdir. Sistemde RT20, RT25 ve RT28HC olmak üzere farklı ergime sıcaklıklarına sahip üç adet FDM araştırılmıştır. Sayısal modellerini literatürdeki deneysel çalışmalarla doğrulamışlardır. FDM'nin PV'nin elektrik üretim performansını %5'e kadar arttırdığını belirtmişlerdir. Soares vd. (2017), mikrokapsüllenmiş FDM ile dolu bir ısı depolama tankı içeren bir PV/FDM sisteminin ısı performansını değerlendirmek için sayısal bir çalışma sunmuştur. Çalışmada, Coimbra, Portekiz iklim koşulları dikkate alınmıştır. 06:00-15:00 saatleri arasında FDM'nin PV sıcaklığının ısı kontrolünde etkin olduğunu gözlemlenmiştir. Mikrokapsüllenmiş FDM'lerin PV'nin yüksek çalışma sıcaklığını azaltarak elektrik üretim performansını arttırmak için kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca FDM haznesinin ideal kalınlığının yaklaşık 3,3 cm olduğunu bulmuşlardır.

2.1.2 Deneysel Çalışmalar

Hachem vd. (2017) saf vazelin ve kombine FDM (vazelin, bakır ve grafit içeren) kullanımının PV panelin ısı davranışı ve elektriksel performansı üzerindeki etkisini deneysel olarak

araştırmışlardır. PV panellerin elektriksel verimliliğinin, saf vazelin kullanılması durumunda ortalama %3, kombine FDM kullanılması durumunda ise ortalama %5,8 arttırıldığını belirtmişlerdir. Luo vd. (2017) bir PV/FDM sistemini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Deneysel yüksek ısı iletkenliğe sahip şekil kararlı parafin (ZDJN-28) /EG kompozit FDM kullanmışlardır. Buna ek olarak, deneyler ile aynı koşullar altında sıcaklık değişimini sayısal olarak incelemek için FLUENT yazılımında sayısal bir model oluşturmuşlardır. Geleneksel bir PV panelin ve PV/FDM sisteminin sıcaklığı, çıkış voltajı ve gücünü ölçerek ve sayısal model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre, PV/FDM sisteminin sıcaklığının, geleneksel PV panelin sıcaklığına kıyasla 200 dakika boyunca 50°C'nin altında tutulmuştur. Panelin elektrik üretim verimliliği ise ortalama %7,28 arttırılmıştır. Hasan vd. (2016), Birleşik Arap Emirlikleri iklim koşullarında, FDM'nin PV'nin güç üretimi ve iç mekân ısı kazanımı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Sistem, PV'nin arkasına bir FDM katmanı ve bu katmanın arkasına yalıtılmış bir bölme eklenmesiyle oluşturulmuştur. FDM katmanı PV elektrik üretiminde maksimum %7,2 ve ortalama %5 oranında bir artış sağlamıştır. Buna ek olarak, kapalı alanı soğutma etkisinin, maksimum %9,5 ve ortalama %7 oranında arttırıldığını gözlemlemişlerdir. Hasan vd. (2017) Birleşik Arap Emirlikleri'nin sıcak iklim koşullarında PV/FDM sisteminin enerji tasarrufuna sağladığı yıllık kazancı incelenmiştir. 38-43°C ergime aralığına sahip parafin esaslı FDM kullanmışlardır. Sonuç olarak, PV'nin yıllık elektrik üretim verimliliği %5,9 oranında arttırılmıştır.

2.2 PV/T Sistemleri

2.2.1 İş Akışkanı Olarak Hava Kullanılan PV/T Sistemleri

Gaur vd. (2016), binaya entegre bir PV/T-hava sistemini sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Sistemde yarı saydam monocrystalline PV panel kullanılmıştır. Yarı saydam PV panel ve PV/T-hava sistemi karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve sıcaklığa bağlı elektriksel verim ifadesi türetilmiştir. Deneysel çalışmalar Hindistan, Yeni Delhi iklim koşullarında, Hindistan Teknoloji Enstitüsü'ndeki prototip yarı saydam monocrystalline PV içeren PV/T-hava sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal model ve deney sonuçları arasında uyum gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak PV panelin elektriksel ve ısı enerji üretim miktarları sırasıyla 7,56 kWh ve 3,9 kWh bulunmuştur. PV/T sisteminde ise bu değerler sırasıyla 8,3 kWh ve 2,7 kWh'tir. Saygın vd. (2017), PV/T-hava sistemine ait İstanbul, Türkiye iklim koşullarında deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. İncelenen sistemde hava PV/T sistemine cam kaplamanın ortasındaki bir yuvadan girmekte ve yukarı-aşağı yönlerde hareket ederek PV'yi soğutmaktadır. Cam kaplama ve PV arasındaki boşluk değiştirilerek sistem verimine etkisi incelenmiştir. En verimli tasarım boşluğun 3 cm olması durumunda elde edilmiştir. Ancak en yüksek elektriksel verim 5 cm boşluk olması durumundadır. Ayrıca kütleli debinin arttırılması

sistem verimini arttırmıştır. Slimani vd. (2017), (1) geleneksel PV, (2) geleneksel PV/T-hava sistemi, (3) cam kaplamalı tek geçişli PV/T-hava sistemi ve (4) cam kaplamalı çift geçişli PV/T-hava sistemi olmak üzere 4 farklı sistemi Cezayir'in yaz mevsimi iklim koşullarında sayısal olarak incelemişlerdir. Analizlerde kütleli debi 0,023 kg/s olarak alınmıştır. Günlük ortalama elektriksel, ısı ve toplam verim değerleri PV panel için sırasıyla %10,66, %0, %29,63, geleneksel PV/T-hava sistemi için %10,73, %21,19, %51,02, cam kaplamalı tek geçişli PV/T-hava sistemi için %10,33, %40,77, %69,47 ve cam kaplamalı çift geçişli PV/T-hava sistemi için %10,65, %44,41 ve %74 olarak bulunmuştur. Tabet vd. (2016), Cezayir iklim koşullarında güney yönlü ve dikey olarak yerleştirilmiş bir PV/T-hava sistemini sayısal olarak incelemiş ve geliştirdikleri modeli deneysel olarak doğrulamışlardır. Sayısal model Fortran programlama dilinde Runge-Kotta yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir. 817,47 W/m² güneş ışınımı ve 24°C dış ortam sıcaklığı koşulları altında ısı ve elektriksel verim sırasıyla yaklaşık %63 ve %10 olarak bulunmuştur.

2.2.2 İş Akışkanı Olarak Su Kullanılan PV/T Sistemleri

Preet vd. (2017), Hindistan iklim koşulları altında, (1) Geleneksel PV panel, (2) çift yutucu plaka içeren PV/T-su sistemi, (3) FDM içeren PV/T-su sistemi olmak üzere üç farklı PV sistemini test etmiştir. FDM içeren PV/T sisteminde RT30 parafin tipi FDM kullanılmıştır. Deneyler, 0,013 kg/s, 0,023 kg/s ve 0,031 kg/s olmak üzere üç farklı kütleli debide gerçekleştirilmiştir ve debi değişiminin elektriksel ve ısı verimliliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deneyler sonucunda geleneksel PV panelin sıcaklığının 85°C'ye kadar çıktığı görülmüştür. PV/T su sisteminde bu sıcaklık değerinin %47, FDM içeren PV/T-su sisteminde ise %53 oranında azaltıldığı gözlenmiştir. 0,031 kg/s debinin en çok sıcaklık düşümü sağladığı bildirilmiştir. Aste vd. (2016), PV/T-su sistemi için TRNSYS ticari yazılımı kullanarak bir sayısal model önermişlerdir. Politecnico di Milano Üniversitesi'ne ait bir test istasyonunda geliştirdikleri modeli doğrulamak için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve belirsizlik analizi yapılmıştır. Sıcaklık artışından dolayı verim kaybı ve sistemin ısı ataleti gibi kolektörün performansını etkileyen ana parametreleri dikkate almışlardır. Sayısal modelde Milan, Paris ve Atina iklim koşullarındaki sistem performansı incelenmiştir. Üç iklim bölgesi için elektriksel verimlilik değerleri birbirine yakın sonuçlar verirken, diğer merkezlere göre sıcak iklime sahip olan Atina şehrinde ısı verimliliği daha yüksektir. Paris, Milan ve Atina şehirleri için sırasıyla yıllık toplam ısı enerji üretimi 350, 450 ve 750 kWh/yıl, elektriksel enerji üretimi 250, 300 ve 390 kWh/yıl olarak bulunmuştur. Michael ve Selvarasan (2016), bakır bir ısı yutucu plaka üzerine yerleştirilmiş PV hücresi kullanılarak oluşturulmuş PV/T-su sistemini deneysel olarak incelemiştir. Bakır yutucu plaka ısı direnci %9,93 oranında azaltmış ve PV'den plakaya olan ısı transferini iyileştirmiştir. Deneyler Hindistan iklim koşullarında, 2014 yılının Mart ayında gerçekleştirilmiştir. Sistem camlı ve camsız olarak test edilmiştir ve cam kaplamalı sistemden



0,1 kg/s debide su geçirilmesi durumunda toplam sistem verimliliği %87,52 bulunmuştur. Nahar vd. (2017), yutucu plaka içermeyen bir PV/T-su sistemini incelemiştir. COMSOL Multiphysics yazılımı kullanılarak sistemin üç boyutlu bir sayısal analizi yapılmış ve Malezya iklim koşulları altında deneysel olarak incelenmiştir. Sayısal model sonuçlarının deneysel ölçümler ile iyi bir uyum gösterdiğini bildirmişlerdir. Yutucu plaka içermeyen PV/T'nin ısı performansının, geleneksel PV/T ile neredeyse aynı olduğunu belirtmişlerdir. PV/T sisteminin maksimum toplam verimliliğini %84,4 bulmuşlardır. Elde edilen maksimum elektriksel verimlilik ise %11,3'tür. Maliyetin ve sistemin toplam ağırlığının azaltılması için yutucu plakanın PV/T sisteminden çıkarılabileceğini önermişlerdir.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1 Referans PV Analizleri

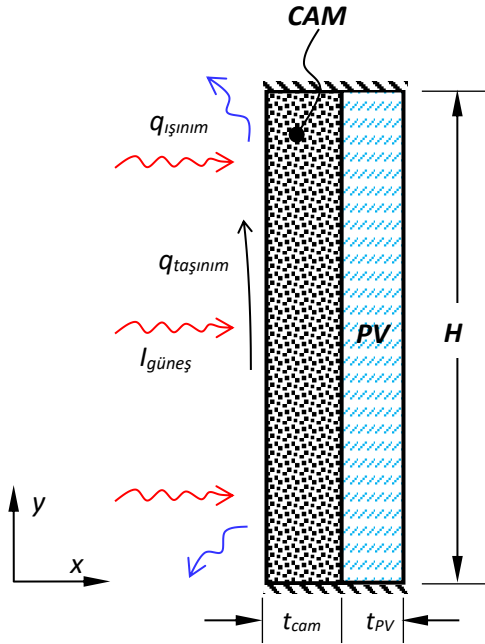
3.1.1 Problemin Tanımı

PV panele ait 1-boyutlu ve zamana bağlı matematiksel model C++ programlama dilinde geliştirilmiştir. Sistemin şematik gösterimi Şekil 3.1'de verilmiştir. PV panelin $t_{cam} = 3$ mm kaplama camı ve $t_{PV} = 1$ mm plastik malzemeden oluştuğu kabul edilmiştir (Cellura vd., 2008). Panel ve camın termofiziksel özellikleri Tablo 3.1'de verilmektedir.

Tablo 3.1. Malzemelerin termofiziksel özellikleri (Cellura vd., 2008)

Malzeme	Özgül Isı	Yoğunluk	Isı İletim Katsayısı
	(J/kgK)	(kg/m ³)	(W/mK)
Cam	500	3000	1,8
PV/Plastik	1255	1760	0,1

Bina entegreli PV panellerde panel arka yüzeyinin bina duvarına direkt temas etmesinden dolayı arka yüzey adiabatik olarak kabul edilmektedir (Hendricks vd., 2011). Şekil 3.1'de şematik görünümü verilen sistemin alt ($y = 0$), üst ($y = H$) ve sağ ($x = W = t_{cam} + t_{PV}$) yüzeyleri yalıtılmış ($\partial T/\partial y|_{y=0, H} = 0$ ve $\partial T/\partial x|_{x=W} = 0$) olarak düşünülmüş ve problem bir boyuta indirgenmiştir. Sol yüzey ($x = 0$) dış ortamla etkileşim halindedir. Yüzey ve dış ortam arasındaki ısı transferi ışınlama ve taşınımla gerçekleşmektedir.



Şekil 3.1. Matematiksel model

Sistem üzerine etki eden güneş ışınımının ($I_{güneş}$) bir kısmı cam içerisinden geçip PV'ye etki etmektedir. Dış ortamla cam kaplamanın dış yüzeyi arasındaki enerji dengesi aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$-k \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = q''_{güneş} - q''_{tasinim} - q''_{isinim} \quad (3.1)$$

burada $q''_{güneş}$ birim alan başına düşen güneş ışınımını, $q''_{tasinim}$ ve q''_{isinim} yüzeyden taşınım ve ışınım ile olan ısı kayıplarını temsil etmektedir. Yüzeyden dış ortama taşınım ile olan ısı transferi doğal ve zorlanmış taşınımın birleşiminden oluşmaktadır. Taşınım ile gerçekleşen toplam ısı transferi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$q''_{tasinim} = h_{toplam} (T_{yüzey} - T_{\infty}) \quad (3.2)$$

burada $T_{yüzey}$ ve T_{∞} sırasıyla cam kaplamanın dış yüzey sıcaklığını ve çevre sıcaklığını temsil etmektedir. h_{toplam} ise yüzey ve dış ortam arasındaki bütünlük taşınım ile ısı transferi katsayısıdır. Hendricks vd. (2011) bütünlük taşınım ile ısı transferi katsayısını aşağıdaki gibi tanımlamıştır,

$$h_{toplam} = (h_{dogal}^3 + h_{zorlanmis}^3)^{1/3} \quad (3.3)$$

$$h_{dogal} = 1,78(T_{yüzey} + T_{\infty})^{1/3} \quad (3.4)$$

$$h_{zorlanmis} = 2,8 + 3,0v \quad (3.5)$$

Eşitlik (3.5)'teki v rüzgâr hızını (m/s) temsil etmektedir. Yüzeyden ışınım ile olan ısı transferi ise Stefan-Boltzmann denklemi ile hesaplanabilir,

$$q''_{isinim} = \epsilon \sigma (T_{yüzey}^4 - T_{sky}^4) \quad (3.6)$$

burada T_{sky} gökyüzü sıcaklığını temsil etmektedir. Dış ortam sıcaklığı ile T_{sky} arasındaki ilişki aşağıda verilen Swinbank eşitliği (Hendricks vd., 2011) ile tanımlanmıştır,

$$T_{sky} = 0,0375367T_{\infty}^{1.5} + 0,32T_{\infty} \quad (3.7)$$

3.1.2 Korunum Denklemleri

Bir boyutlu ve zamana bağlı sayısal modelde kaplama camı tabakası için enerji denklemi,

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c T) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q''_{gen,cam} \quad (3.8)$$

burada ($Q''_{gen,cam}$) cam içerisindeki hacimsel ısı üretimini temsil etmektedir. Literatürde genel yaklaşım olarak bu terim ihmal edilmektedir. Mevcut çalışmada, oluşturulan kodun basitleştirilmesi adına cam içerisindeki ısı üretimi hesaplamalarda ihmal edilmiştir.

PV katmanında ise kontrol hacmine etki eden güneş ışınımı ve elektrik üretimi terimleri enerji denklemini içerisinde kaynak terim olarak dâhil edilmektedir,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c T) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - P_{out}''' + Q_{gen}''' \quad (3.9)$$

burada hacimsel güç üretimi ve ısı kaynak terim şu şekilde tanımlanır: $P_{out}''' \times t_{PV} = \eta_{PV} \times (\alpha_{PV} \tau_{cam} I_{solar})$ ve $Q_{gen}''' \times t_{PV} = (1 - \eta_{PV}) \times (\alpha_{PV} \tau_{cam} I_{solar})$. Panel verimi ise Evans ve Florschuetz (1977) korelasyonu ile sıcaklığa bağlı olarak ifade edilmektedir,

$$\eta_{PV} = \eta_{ref} [1 - \beta_{ref} (T_{PV} - T_{ref})] \quad (3.10)$$

Mevcut bölümde incelenen panele ait parametreler şu şekilde tanımlanmıştır: $\eta_{ref} = 0,124$, $\beta_{ref} = 0,00392 \text{ 1/K}$ ve $T_{ref} = 298 \text{ K}$.

3.1.3 Çözüm Yöntemi

Korunum denklemleri Patankar (1980) tarafından geliştirilen kontrol hacimleri yaklaşımı kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Lineer denklem sisteminin çözümünde TDMA (Tri-Diagonal-Matrix-Algorithm) kullanılmıştır (Chapra, 1998). Kontrol hacimleri 1 mm aralıklarla oluşturulmuş ve analizlerde zaman adımı 0,25 s alınmıştır. Her bir zaman adımı sonunda enerji denkleminin artık terimi 10^{-7} 'nin altına indirilmiştir. Çözüm yönteminin doğruluğunu tespit etmek için sistemin enerji dengesi her bir zaman adımında hesaplanmıştır. Tüm analizlerde enerji dengesindeki sapma %0,01'in altında elde edilmiştir.

3.2 Etkin Isı İletim Katsayısının Elde Edilmesi

3.2.1 Problemin Tanımı

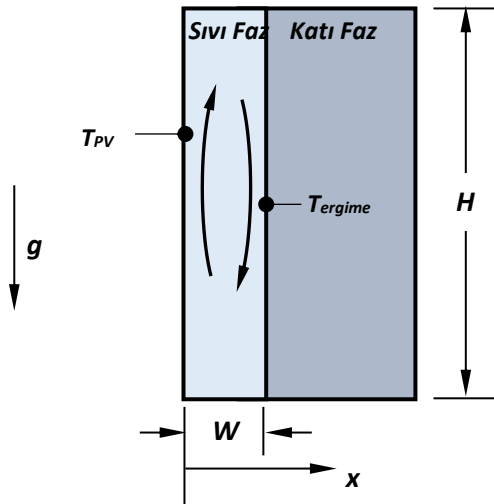
PV panelin pasif ısı kontrolü için panel arka yüzeyine faz değişim malzemesi yerleştirilmesi durumunda sıvı faz içerisinde iletimle ısı geçişinin yanı sıra doğal taşınım etkileri de oluşabilmektedir. Katı/sıvı ara-yüzeyinin FDM haznesi boyunca üniform ilerlediği kabulüyle sıvı bölge içerisindeki ısı transferi farklı görünüm oranlarına sahip dik kavitelere benzetilebilir (Şekil 3.2). Burada sıvı faz bölgesinin sol yüzeyi ($x = 0$) yüksek sıcaklıktaki PV panelini temsil ederken sağ yüzey ($x = W$) ise sabit sıcaklıktaki katı/sıvı ara-yüzeyidir. İki yüzey arasındaki sıcaklık farkına veya geometrik görünüm oranına (H/W) bağlı olarak kavite içerisindeki ısı geçiş mekanizması ısı iletiminden ısı taşınımına doğru geçiş yapabilir. Oluşan taşınım yapıları, yüzeyler arasındaki ısı transferini arttıracığından faz değişimi ara-yüzeyinin daha hızlı ilerlemesine sebep olacaktır. Taşınım ve iletim mekanizmaları arasındaki oran Nusselt sayısı (*etkin ısı iletim katsayısının sıvı fazının ısı iletim katsayısına oranı*) şeklinde tanımlanmaktadır (Bejan, 2013):

$$Nu = \frac{q_{\text{taşınım}}}{q_{\text{iletim}}} = \frac{k_{\text{eff}}}{k_{\text{sıvı}}} \quad (3.11)$$

burada k_{eff} , etkin ısı iletim katsayısı olarak isimlendirilmektedir (Çengel ve Ghajar, 2014). Literatürde farklı görünüm oranlarına sahip kaviteler içerisindeki doğal taşınımlı ısı transferine ait Nusselt korelasyonları bulunmaktadır (Bejan, 2013; Çengel & Ghajar, 2014; Incropera & De Witt, 1985). Ancak önerilen bu korelasyonlar düşük Prandtl sayıları ($Pr \sim 1$) ve yüksek Rayleigh sayıları ($Ra_w > 10^4$) için türetilmiştir. Bejan (2013) ve Çengel ve Ghajar (2014) yüksek ve dar bir kavite içerisindeki doğal taşınım için Rayleigh sayısını yüzeyler arasındaki sıcaklık farkına ve kavite genişliğine bağlı olarak tanımlamaktadır:

$$Ra_w = \frac{g\beta\Delta TW^3}{\nu\alpha} \quad (3.12)$$

PV/FDM sistemlerinde yaygın olarak kullanılan parafin türevi malzemeler için üretici kataloglarından yola çıkarak belirlenen ısıl özellikler göz önüne alındığında parafinin Prandtl sayısı 44 civarında elde edilmektedir (Rubitherm GmbH). Literatürde önerilen Nusselt korelasyonları düşük Prandtl sayılarına sahip akışkanlar için geliştirildiğinden seçilen FDM için uygun değildir. Bu nedenle, bu proje kapsamında incelenen akışkana ait etkin ısı iletim katsayısı korelasyonun türetilmesine yönelik analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2. Matematiksel Model

3.2.2 Çözüm Yöntemi

Dik bir kavite içerisindeki doğal taşınım problemini çözmek için 2-boyutlu bir matematiksel model oluşturulmuştur. Geometrinin üst ve alt yüzeyleri yalıtılmış, dikey yüzeyleri ise sabit sıcaklıkta tutulmaktadır,

$$x = 0 \rightarrow T(x = 0) = T_{PV}, \quad x = W \rightarrow T(x = W) = T_{ergime}$$

$$y = 0 \rightarrow \partial T / \partial y (y = 0) = 0, \quad y = H \rightarrow \partial T / \partial y (y = H) = 0$$

İçerisinde viskoz ısınma olmayan sıkıştırılmaz ve Newtonyen akışkan için (*parafin*) laminer doğal taşınım ısı geçişine ait korunum denklemleri aşağıdaki forma indirgenebilir:

Kütle:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (3.13)$$

x-momentum:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uu) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vu) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial}{\partial x}(\mu u) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial}{\partial y}(\mu u) \right] \quad (3.14)$$

y-momentum:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vv) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial}{\partial x}(\mu v) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial}{\partial y}(\mu v) \right] - g(\rho - \rho_{ref}) \quad (3.15)$$

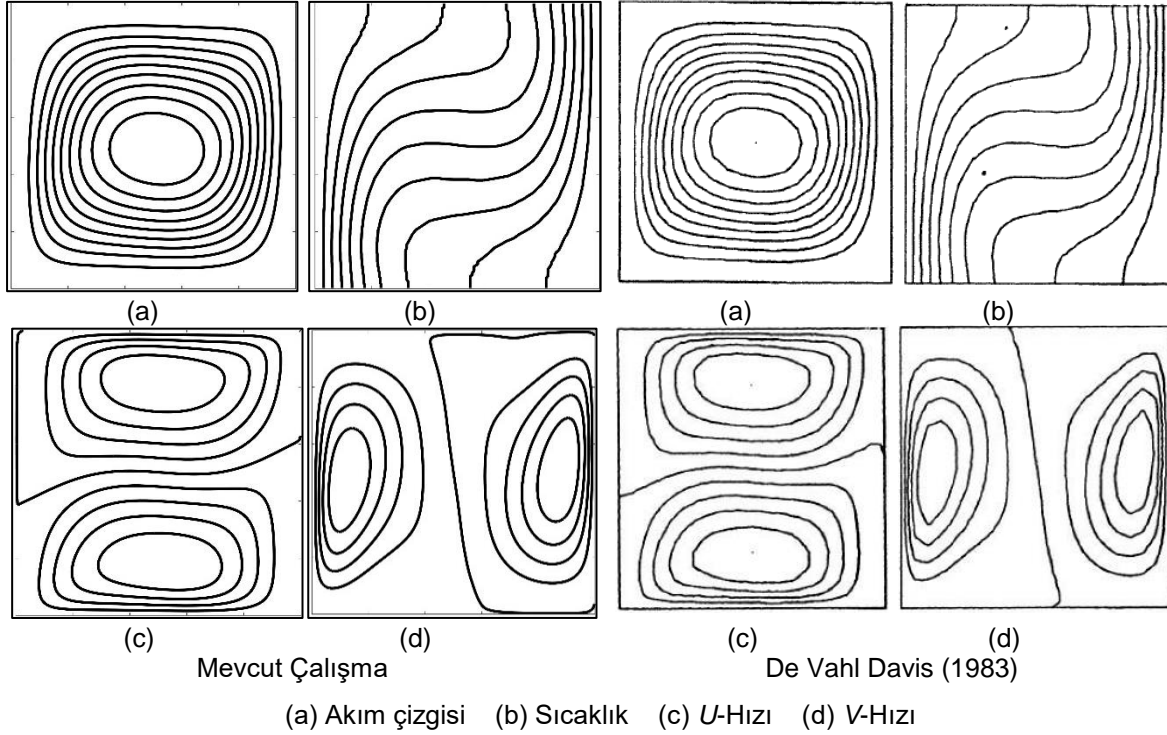
Enerji:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u c T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v c T) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial}{\partial x}(k T) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial}{\partial y}(k T) \right] \quad (3.16)$$

Korunum denklemleri kontrol hacimleri yaklaşımını kullanarak cebirsel denklem sistemlerine indirgenmiştir. Taşınım terimlerinin ayrıklaştırılmasında Power Law şema (Patankar, 1980) uygulanmıştır. Hız ve basınç çiftinin çözümünde ise CUT (Consistent Update Technique) algoritması kullanılmıştır (Wang vd., 2010). Cebirsel denklem sistemlerinin çözümlenmesinde SIS (Strongly Implicit Solver) (Lee, 1990) algoritması kullanılmıştır. Katı yüzeylerde mesh yoğunluğu %5 oranında arttırılmıştır. Çözümlerler $\Delta t = 0,1$ s zaman adımıyla zamana bağlı yapılmıştır. Soğuk ve sıcak yüzeyler üzerindeki ortalama Nusselt değerleri sürekli rejim için Eşitlik (3.11) ile hesaplanmıştır.

3.2.3 Yöntemin Doğrulanması

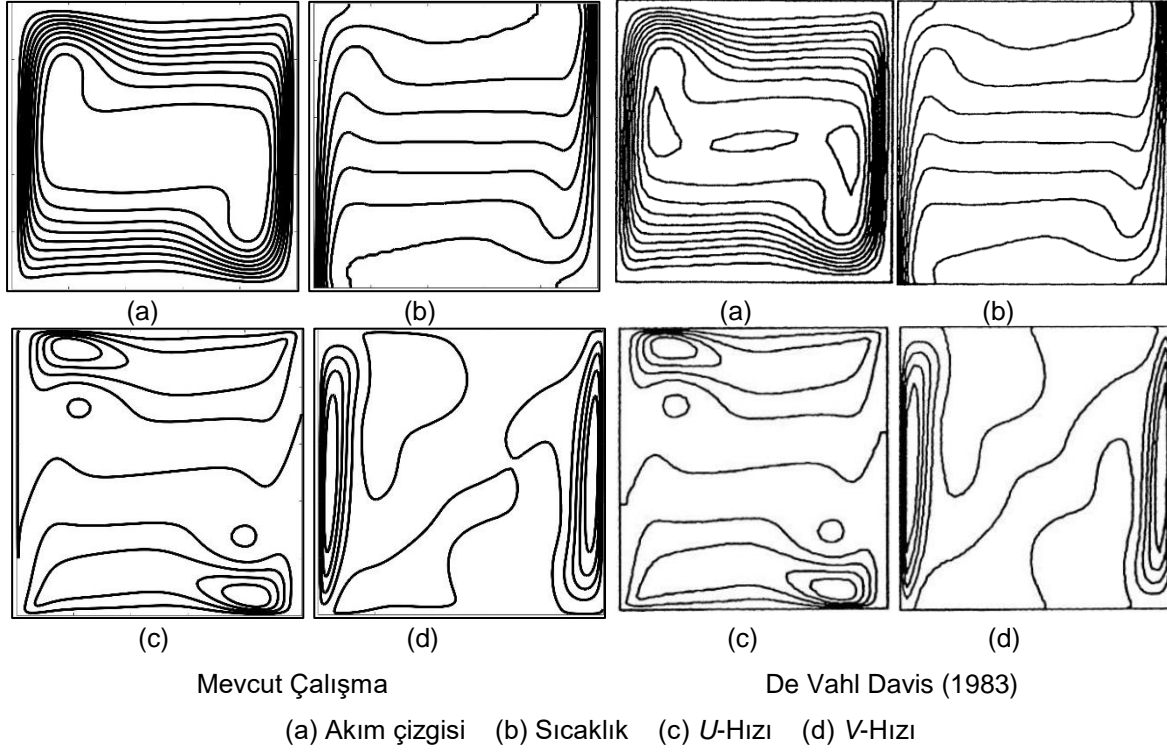
Doğal taşınım kodu ile elde edilen sıcaklık ve hız dağılımları ile yüzeyler üzerindeki ortalama Nusselt sayılarının doğruluğunu kontrol etmek amacıyla de Vahl Davis (1983) tarafından ele alınan doğal taşınım problemi tekrarlanmıştır. Bu bağlamda, kare bir kavite içerisindeki havanın ($Pr = 0,7$) farklı Rayleigh sayıları için doğal taşınımı modellenmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 3.3'te ise $Ra = 10^4$ için elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.



Şekil 3.3. Doğal Taşınım Çözümü Doğrulaması – $Ra = 10^4$

Artan doğal taşınım etkisi nedeniyle eş sıcaklık eğrileri kavitenin orta kısmında yatay hale geçmektedir. Kavitenin sol alt ve sağ üst köşelerinde eş sıcaklık eğrilerinin yoğunlaştığı görülmektedir. Bunun nedeni, sıcak ve soğuk yüzeylerde oluşan sınır tabakalardır. Yoğunlaşan eş sıcaklık eğrileri yerel ısı transfer hızının veya bir başka deyişle yerel Nusselt sayısının yüksek olduğu anlamına gelmektedir. $Ra = 10^4$ için mevcut sonuçlar ile referans çalışma bulgularının uyum içinde olduğu açıktır.

Çalışma kapsamında geliştirilen sayısal kod laminar sınır tabaka kabulüyle oluşturulmuştur. $Ra = 10^6$ üst limit olarak alınmış ve böylece sınır tabakanın laminerde kalması sağlanmıştır. Şekil 3.4'te $Ra = 10^6$ için elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu durum için kavite içerisinde doğal taşınımın baskın ısı transferi mekanizması olduğu anlaşılmaktadır. Eş sıcaklık eğrileri kavite ortasında yataydır ve bu bölgede akışkan hareketi oldukça düşük seviyededir. Akım çizgileri incelendiğinde sıcak ve soğuk yüzeyler üzerinde oluşan sınır tabaka yapısı belirgin olarak görülmektedir. Soğuk yüzey üzerinden hızlanarak alt yüzeye çarpan akışkan alt yüzeyden kopma eğilimi göstermektedir. Artan Rayleigh sayısı bu etkiyi arttıracak ve kavite içerisinde çok daha karmaşık akış yapısına sebep olacaktır. İncelenen diğer Rayleigh sayılarında olduğu gibi $Ra = 10^6$ için de sıcaklık ve hız dağılımları literatürdeki dağılımlarla benzerdir.



Şekil 3.4. Doğal Taşınım Çözümü Doğrulaması – $Ra = 10^6$

Sayısal kodun doğruluğundan emin olmak için hız ve sıcaklık dağılımlarının yanı sıra, sıcak ve soğuk yüzeyler üzerindeki ortalama Nusselt sayıları literatürdeki farklı çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Tablo 3.2, literatürden alınan üç farklı çalışmada elde edilen Nusselt değerleri ile mevcut çalışma sonuçlarını bir arada sunmaktadır. Düşük Rayleigh sayıları ($Ra = 10^4$) için elde edilen Nusselt sayılarıyla de Vahl Davis tarafından sunulan benchmark sonuçları arasındaki fark %1'in altındadır. Benzer şekilde Markatos ve Kinney (1984) tarafından elde edilen sonuçlar ile mevcut çalışma bulguları arasındaki en yüksek fark %1,45 olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak, proje kapsamında oluşturulan sayısal kodun kavite içerisindeki doğal taşınım problemini hassas bir şekilde modelleyebildiği söylenebilir.

Tablo 3.2. Farklı Rayleigh sayıları için Nusselt sayıları

Kaynak	$Ra = 10^3$	% Fark	$Ra = 10^4$	% Fark	$Ra = 10^5$	% Fark	$Ra = 10^6$	% Fark
Mevcut Çalışma	1,1166	-	2,2333	-	4,4729	-	8,637	-
Markatos ve Kinney 1984	1,108	0,77	2,201	1,45	4,430	0,96	8,754	1,35
Mahdi ve Kinney 1990 (11x11)	1,114	0,23	2,294	2,72	4,369	2,32	-	-
Mahdi ve Pericleous 1990 (21x21)	1,113	0,32	2,248	0,66	4,576	2,30	-	-
De Vahl Davis (11x11)	1,096	1,84	2,171	2,79	4,446	0,60	6,105	29,32
De Vahl Davis (21x21)	1,111	0,50	2,212	0,95	4,454	0,42	9,027	4,52
De Vahl Davis (Benchmark)	1,118	0,13	2,243	0,43	4,519	1,03	8,800	1,89

3.3 PV/FDM Matematiksel Modelinin Kurulması

3.3.1 Problemin Tanımı

Bu modelde, PV/FDM sisteminin ısıl davranışını modellemek için Bölüm 3.1 kapsamında oluşturulan C++ koduna faz değişim malzemesi haznesi ilave edilmiştir. Buna göre, Şekil 3.1'de verilen geometride, PV katmanın sağına farklı kalınlıklarda FDM'ler yerleştirilmiştir. İzmir ili için PV/FDM sisteminin zamana bağlı PV sıcaklığı, güç üretimi ve sistem verimi değerleri yıllık olarak elde edilmiştir. Sistemde mevsime bağlı olarak uygun FDM'yi belirleyebilmek amacıyla RT28HC, RT31, RT35HC, RT42 ve RT44HC olmak üzere 5 farklı ergime sıcaklığına sahip FDM kullanılmıştır. Kullanılan FDM'lere ait ısıl özellikler Tablo 3.3'te verilmiştir. Farklı tip FDM'ler için hazne kalınlığı 1 cm ile 3 cm aralığında değiştirilerek, FDM miktarının sistem verimine etkisi incelenmiştir.

Tablo 3.3. Kullanılan FDM'lere ait ısıl özellikler (Rubitherm GmbH)

Özellik	RT28HC		RT31		RT35HC		RT42		RT44HC	
	Sıvı	Katı	Sıvı	Katı	Sıvı	Katı	Sıvı	Katı	Sıvı	Katı
T_{ergime} (°C)	28		31		35		42		44	
h_{sf} (J/kg)	250000		250000		240000		25000		25000	
c (J/kgK)	2000		2000		2000		2000		2000	
ρ (kg/m ³)	770	880	770	880	770	880	770	880	770	880
k (W/mK)	0,2		0,2		0.2		0,2		0,2	

3.3.2 Çözüm Yöntemi

Bölüm 3.1'de verilen denklemlere ilave olarak FDM katmanı için entalpi terimlerini içeren bir denklem kullanılmalıdır. Cao ve Faghri (1990), entalpinin sıcaklığa bağlı değişimini ifade eden lineer bir denklem önermişlerdir ($H = CT + S$). Bu denkleme göre FDM katmanı için entalpi denklemi şu şekilde verilebilir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(CT) + \frac{\partial}{\partial t}(S) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.17)$$

burada ısı kapasitesi, $C (= \rho c)$, ısı iletim katsayısı, k ve kaynak terim, S , malzemenin katı ve sıvı fazlarına göre değişiklik göstermektedir. Faz değişimli ısı transferi problemi ergime/katılaşma bölgesindeki faz değişim entalpisi nedeniyle yüksek kaynak terimler içerir. Sayısal çözümün kararlılığını arttırmak için Cao ve Faghri (1990), faz değişiminin belli bir sıcaklık bandında gerçekleştiğini kabul etmiştir. Bu nedenle, modelde katı ve sıvı fazlara ilave olarak ara faz kabulü yapılmaktadır. Faz değişimi katılaşma (*solidus*), $T_{solidus} (= T_m - \delta T_m)$ ve sıvılaşma (*liquidus*), $T_{liquidus} (= T_m + \delta T_m)$ sıcaklıkları arasında gerçekleşmektedir. Solidus ve

liquidus sıcaklıkları arasındaki bölge ise ara-faz (*mushy*) olarak bilinmektedir (Cao ve Faghri, 1990). C ve S terimleri her bir faz için aşağıdaki şekilde tanımlanır,

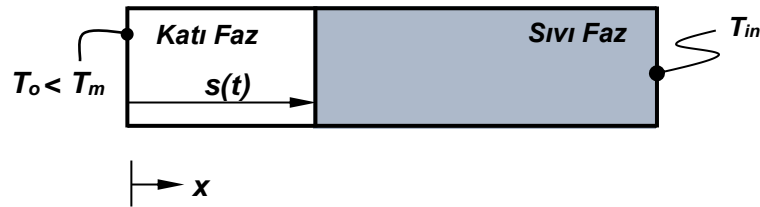
$$C(T) = \begin{cases} (\rho c)_s & T < T_m - \delta T_m \\ (\rho c)_m + \rho_l \frac{h_{sf}}{2\delta T_m} & T_m - \delta T_m \leq T \leq T_m + \delta T_m \\ (\rho c)_l & T > T_m + \delta T_m \end{cases} \quad (18)$$

$$S(T) = \begin{cases} (\rho c)_s (\delta T_m - T_m) & T < T_m - \delta T_m \\ (\rho c)_m (\delta T_m - T_m) + \rho_l \frac{h_{sf}}{2} - \rho_l \frac{h_{sf}}{2\delta T_m} T_m & T_m - \delta T_m \leq T \leq T_m + \delta T_m \\ (\rho c)_s \delta T_m - (\rho c)_l T_m + \rho_l h_{sf} & T > T_m + \delta T_m \end{cases} \quad (19)$$

Faz değişimli ısı iletiminin çözümünde Bölüm 3.1'de açıklanan korunum denklemlerine ilave olarak Eşitlik 3.18 ve 3.19'da tanımlanan terimler matematiksel modele dahil edilmiştir. 1-boyutlu modelin çözümünde Bölüm 3.1'de belirtilen çözüm yöntemi aynen uygulanmıştır.

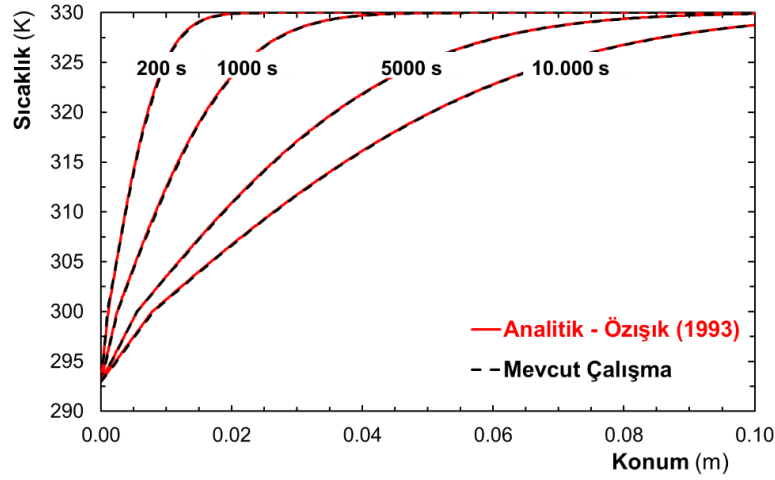
3.3.3 Yöntemin Doğrulanması

Mevcut problemde PV panelin dış yüzeyinde ısıtım ve taşınım bir arada bulunmaktadır. Literatürde böylesi bir sınır koşulu için faz değişimli kavite içerisindeki ısı transferi probleminin analitik çözümü yoktur. Bu nedenle, çalışma kapsamında uygulanan çözüm yönteminin doğrulanması için sınır koşulu ve geometri literatürdeki analitik çözümlere uygun olarak yeniden oluşturulmuştur. Şekil 3.5'te Özişik (1993) tarafından incelenen yarı sonsuz geometri ve sınır koşulları gösterilmektedir. Bu problemde PCM başlangıçta ergime sıcaklığının (T_m) üzerinde bir başlangıç sıcaklığındadır ($T_{in} > T_m$). Geometrinin sol yüzeyi aniden faz değişim sıcaklığının altındaki sabit bir sıcaklığa düşürülmekte ($T_o < T_m$) ve böylece pozitif x-yönünde katı/sıvı ara-yüz pozisyonu, $s(t)$, ilerlemektedir. Bir boyutlu geometrinin sağ yüzeyi ise tüm işlem boyunca başlangıç sıcaklığındadır.



Şekil 3.5. Yarı sonsuz modelde faz değişimi (Özişik, 1993)

Sayısal kod ile elde edilen sıcaklık dağılımları ile analitik çözüm sonuçları Şekil 3.6'da karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. $t = 200$ s, 1000 s, 5000 s ve 10000 s için verilen sonuçlarda düz çizgiler analitik çözümü, kesik çizgiler ise mevcut sayısal çalışmayı temsil etmektedir. Sayısal kod sonuçlarının analitik çözümle uyumlu olduğu görülmektedir. İki yöntem arasındaki fark %1'in altındadır.



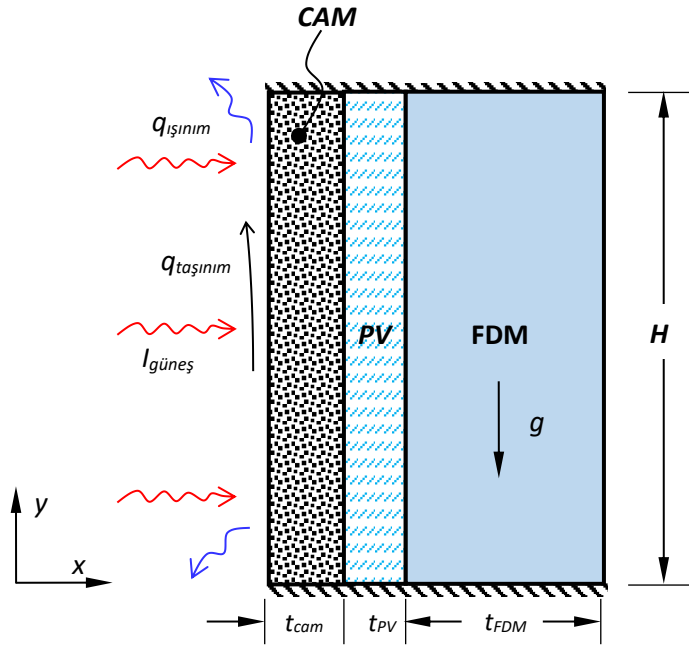
Şekil 3.6. Faz değişimli ısı iletimi probleminin doğrulanması

3.4 Doğal Taşınım PV/FDM Matematiksel Modelinin Kurulması

Bu kısımda PV arka yüzeyine yerleştirilen FDM haznesi içerisindeki doğal taşınım sayısal olarak modellenmiştir. Öncelikle çözüm yönteminin doğrulanması için literatürden alınan içe doğru ergime sonuçlarıyla mevcut çalışma bulguları karşılaştırılmıştır. Çözüm yönteminin doğruluğu ortaya konulduktan sonra farklı çalışma koşulları (*sabit ve değişken güneş ışınımı*) ve değişen FDM kalınlıkları için parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. FDM içerisindeki doğal taşınım hareketinin PV sıcaklık değişimine etkisini irdelemek amacıyla tüm parametreler için iletim ve taşınım etkilerinin baskın olduğu iki set analiz yapılmıştır.

3.4.1 Problemin Tanımı ve Çözüm Yöntemi

Ele alınan probleme ait şematik gösterim Şekil 3.7'de verilmektedir. FDM içerisindeki doğal taşınım faz değişim probleminin çözümünde Bölüm 3.2 kapsamında sunulan süreklilik ve hareket denklemlerinin yanı sıra enerji denklemi çözümlenmiştir. Hız ve basınç çiftinin çözümünde CUT algoritması kullanılırken, taşınım terimlerinin ayrıklaştırılmasında Power Law şema uygulanmıştır. Çözüm yöntemine ilişkin detaylar Bölüm 3.2 ve 3.3 kapsamında sunulmuştur.



Şekil 3.7. PV/FDM bütünleşik sistem

3.4.2 Çözüm Yönteminin Doğrulanması

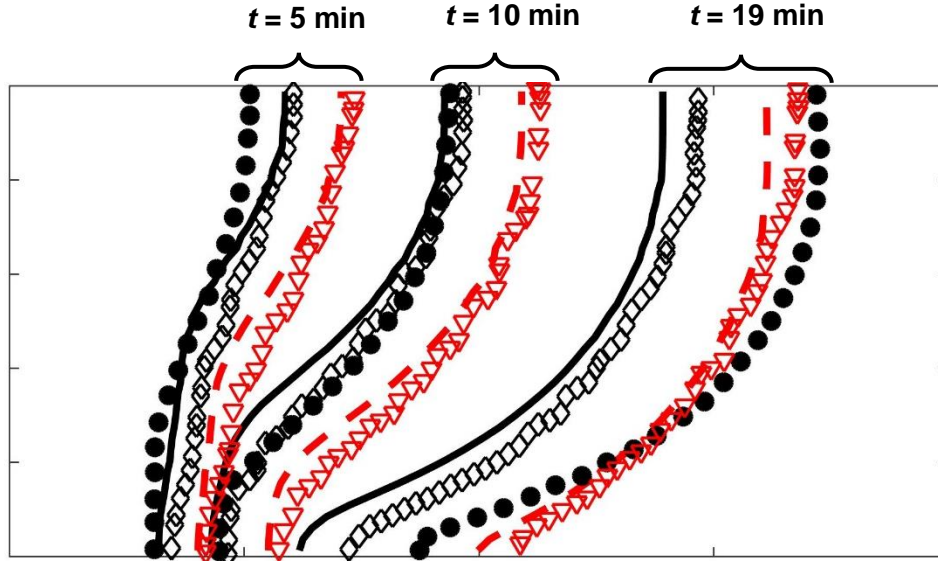
Yöntemin doğrulanması için Gau ve Viskanta (1986) tarafından deneysel olarak incelenen içe doğru ergime problemi tekrarlanmıştır. Kavitenin uzunluğu 8,89 cm, yüksekliği ise 6,35 cm'dir. Ergime sıcaklığı ortam sıcaklığına yakın olduğu için faz değişim malzemesi olarak Galyum kullanılmıştır. Başlangıçta kavitenin sağ ve sol yüzeyi $T_{in} = 28,3^{\circ}\text{C}$ sıcaklığında tutulmaktadır. Böylece Galyum içerisinde yeknesak bir sıcaklık dağılımı olduğu kabul edilmektedir. Sol yüzeyin aniden ergime sıcaklığı üstüne çıkartılmasıyla ($T_{sol} = 38^{\circ}\text{C}$) FDM içe doğru ergimeye başlamaktadır. Galyum'un termofiziksel özellikleri Tablo 3.4'te sunulmaktadır.

Tablo 3.4. Galyum'un termofiziksel özellikleri (Brent vd., 1988)

Yoğunluk	ρ	6093	kg/m^3
Referans yoğunluk	ρ_{ref}	6095	kg/m^3
Referans sıcaklık	T_{ref}	29,78	$^{\circ}\text{C}$
Isıl genişleme katsayısı	β	$1,2 \times 10^{-4}$	$1/\text{K}$
Isı iletim katsayısı	k	32,00	W/mK
Ergime noktası	T_m	29,78	$^{\circ}\text{C}$
Ergime gizli ısısı	L	80160	J/kg
Özgül ısı kapasitesi	C	381,5	J/kg
Dinamik viskozite	μ	$1,81 \times 10^{-3}$	kg/ms
Prandtl sayısı	Pr	$2,16 \times 10^{-2}$	-

Brent vd. (1988) Galyum'un katı ve sıvı fazlar için aynı ısı iletim katsayısına sahip olduğunu kabul etmişlerdir. Ancak Costa vd. (1991) tarafından da vurgulandığı gibi anizotropik yapısı nedeniyle Galyum'un katı fazı için ısı iletim katsayısı geniş bir aralıkta (16 W/mK ile 88,5 W/mK)

değişmektedir. Bu nedenle katı faza ait ısı iletim katsayısının uygun bir şekilde tanımlanması çözüm belirsizliği açısından oldukça önemlidir. Costa vd. (1991) ilk modellerinde Brent vd. (1988) çalışmasına benzer şekilde Galyum'un ısı iletim katsayısının katı ve sıvı fazlar için eşit olduğunu kabul etmişlerdir. Ancak sayısal analiz sonuçları ile deneysel ölçümler arasındaki özellikle ilerleyen zamanlarda tutarsızlıklar gözlenmiştir. Katı faza ait ısı iletim katsayısının 16 W/mK ile 88,5 W/mK gibi geniş bir aralıkta değiştiği ve bu nedenle katı faza ait ısı iletim katsayısının 16 W/mK ile 88,5 W/mK gibi geniş bir aralıkta değişebileceği vurgulanmıştır. Malzemenin katı fazına ait ısı iletim katsayısı değerinin ergime prosesine etkisini gözlemlemek için $k_S = 32$ W/mK ve $k_S = 48,4$ W/mK olmak üzere 2 farklı ısı iletim katsayısı değeri kullanarak analizleri tekrarlamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre ilk zamanlarda düşük ısı iletim katsayısına sahip malzeme için ara-yüzey pozisyonları deneysel sonuçlarla uyum içindedir. Ancak düşük ısı iletim katsayısı nedeniyle, artan zamanla birlikte sayısal çözümde elde edilen katı/sıvı ara-yüzey profili deneysel sonuçtan uzaklaşmaktadır. Yüksek ısı iletim katsayısının tanımlandığı durumda ise, ergime prosesinin ilk zamanlarında ara-yüzey profili deneysel sonuçlara göre daha hızlı ilerlemektedir. İlerleyen zamanda ise deneysel sonuçla sayısal sonuç arasında uyum gözlenmektedir. Sonuç olarak, Galyum'un anizotropik ısı iletim katsayısına sahip olması nedeniyle sabit bir ısı iletim katsayısı kabulüyle analizlerin doğru sonuç vermediği söylenebilir. Sıralanan belirsizliklere rağmen literatürde ortam sıcaklığı çevresinde içe doğru ergimenin incelendiği en güvenilir kaynak olması açısından araştırmacılar faz değişimi çözümlerini bu referans çalışma ile doğrulamaktadır. Proje kapsamında Galyum'un içe doğru ergime prosesi üç farklı ısı iletim katsayısı kabulü için gerçekleştirilmiştir: (i) katı fazın ısı iletim katsayısı (k_S) = 48,4 ve sıvı fazın ısı iletim katsayısı (k_L) = 32 W/mK, (ii) katı ve sıvı fazın ısı iletim katsayılarının eşit ($k_S = k_L$) ve 48,4 W/mK olması, (iii) katı ve sıvı fazın ısı iletim katsayılarının eşit ($k_S = k_L$) ve 32 W/mK olması. Üç durum için de elde edilen ara-yüzey pozisyonları Costa vd. (1991) tarafından sunulan sayısal model sonuçlarıyla ve Gau ve Viskanta (1986) tarafından elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekil 3.8'de 5 dk, 10 dk ve 19 dk sonundaki ara-yüzey pozisyonları verilmektedir. 5 dk sonunda, Galyum'un ısı iletim katsayısı $k_L = 32$ W/mK & $k_S = 48,4$ W/mK olması durumunda sayısal ara-yüzey sonuçları deneyselle yakındır. 10 dk sonunda ise, en yüksek ısı iletim katsayısı değerleri için, $k_S = k_L = 48,4$ W/mK, sayısal katı-sıvı ara-yüzey pozisyonu deneyselle göre daha hızlı ilerlemiştir. $t = 10$ dk için ısı iletim katsayısının $k_L = 32$ W/mK & $k_S = 48,4$ W/mK olarak tanımlanması durumunda deneysel sonuçlara en yakın arayüzey pozisyonu gözlenmiştir. Öte yandan, $t = 19$ dk için ısı iletim katsayısının $k_S = k_L = 48,4$ W/mK olması durumunda deneyselle en yakın sonucu vermiştir.



- ◇ Costa vd. (1991) ($k_s = 32 \text{ W/mK}$), ▽ Costa vd. (1991) ($k_s = 48.4 \text{ W/mK}$)
 — Mevcut Çalışma ($k_L = 32 \text{ W/mK}$ & $k_S = 48.4 \text{ W/mK}$), ● Gau ve Viskanta (1986)
 --- Mevcut Çalışma ($k_L = k_S = 48.4 \text{ W/mK}$)

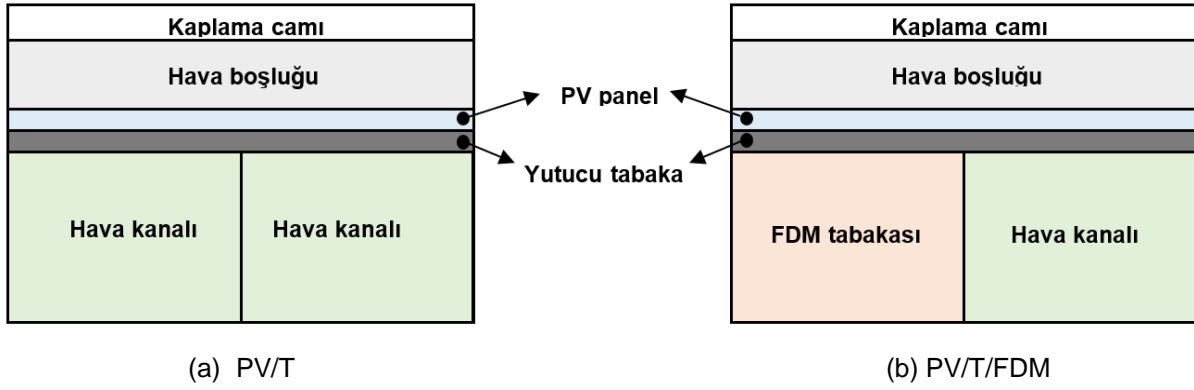
Şekil 3.8. Katı-sıvı ara-yüzeyinin ilerlemesi

Parametrik doğrulama analizleri neticesinde proje kapsamında geliştirilen doğal taşınımli faz değişim modeli sonuçlarının literatürdeki deneysel ve sayısal dağılımlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Doğrulama analizlerinden sonra farklı çalışma ve tasarım parametreleri için karşılaştırmalı sonuçlar elde edilerek iletim ve taşınım etkili modeller arasındaki fark yorumlanmıştır.

3.5 PV/T ve PV/T/FDM Matematiksel Modellerinin Kurulması

3.5.1 Problemin Tanımı ve Çözüm Yöntemi

PV/T ve PV/T/FDM sistemlerine ait 3-boyutlu sayısal modeller ANSYS-FLUENT paket programı kullanılarak oluşturulmuştur. Sistemlerin şematik görünümü Şekil 3.9'da verilmiştir. PV/T sistem için ele alınan geometri yukarıdan aşağıya 5 katmandan oluşmaktadır: kaplama camı ($t_{cam} = 4 \text{ mm}$), hava boşluğu ($t_{boşluk} = 25 \text{ mm}$), PV ($t_{PV} = 1 \text{ mm}$), yutucu tabaka ($t_{yutucu} = 2 \text{ mm}$), hava kanalı ($t_{kanal} = 10 \text{ cm}$). PV/T/FDM sistemi için ise hava kanalının yanında hava kanalıyla aynı boyutlarda FDM tabakası oluşturulmuştur. Bu katmanlara ait termofiziksel özellikler Tablo 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.9. PV/T ve PV/T/FDM sistemlerinin şematik görünümü

Tablo 3.5. Malzemelere ait termofiziksel özellikler

Malzeme	Özgül Isı (J/kgK)	Yoğunluk (kg/m ³)	Isı İletim Katsayısı (W/mK)
Kaplama camı	810	2515	0,9
Hava	1006,43	1,225	0,0242
PV panel	900	2300	140
Yutucu tabaka	903	2702	310
FDM	2000	880	0.2

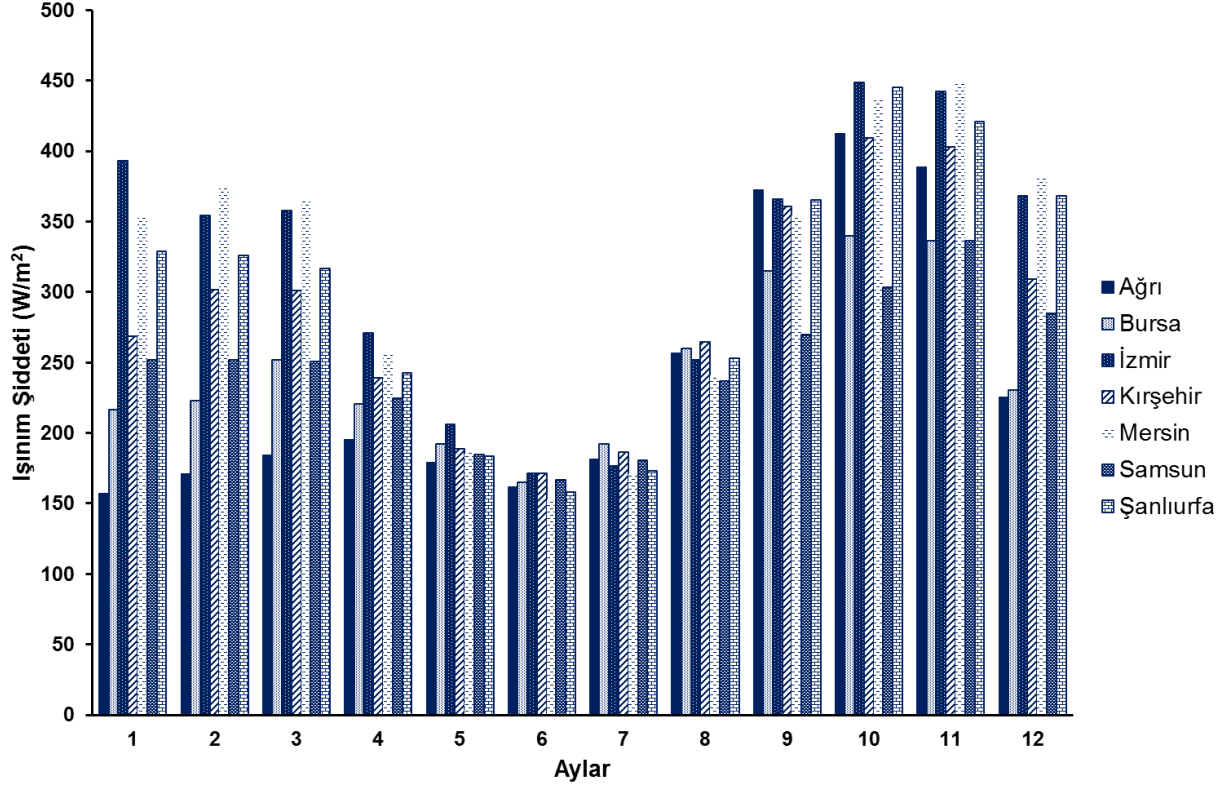
Şekil 3.9'da yandan gösterimi verilen üç boyutlu modele ait süreklilik, momentum ve enerji denklemleri $\Delta t = 10$ s zaman adımıyla çözümlenmiştir. Kaplama camı ve PV tabakası arasındaki hava boşluğunun ısı iletim katsayısı, $k_{hava\ boşluğu} = 2k_{hava}$ ve $k_{hava\ boşluğu} = k_{eff}$ olmak üzere iki farklı yaklaşım kullanılarak modele dahil edilmiştir. Etkin ısı iletim katsayısı yaklaşımının kullanıldığı sayısal modelde, hava boşluğunun ısı iletim katsayısı Çengel ve Ghajar (2014) tarafından bağıntı kullanılmıştır. Anlık güneş ışınımı, dış ortam sıcaklığı ve rüzgar hızının ANSYS-FLUENT programına aktarılması amacıyla kullanıcı tanımlı fonksiyon (UDF-User Defined Function) kullanılmıştır. PV içerisindeki güç üretimi ve ısınma etkisinin yanı sıra, cam üzerindeki birleşik taşınım katsayısının ve gökyüzü sıcaklığının her bir zaman adımı için hesaplanması için Bölüm 3.1'deki eşitlikler için UDF'ler hazırlanmıştır. PV/T ve PV/T/FDM sistemleri için iki farklı akış stratejisi incelenmiştir. İlk analizlerde önceden belirlenmiş zaman aralıklarında hava akışı açılmıştır. İkinci analiz paketinde ise PV sıcaklığı takip edilmiş ve belirli bir üst limite ulaşıncaya hava akışı aktif hale getirilmiştir. Zamana veya sıcaklığa bağlı akış hızının aktifleştirilmesi için de farklı UDF'ler kodlanmıştır.

3.6 İller Bazında PV/FDM Sistemine Ait Sonuçların Elde Edilmesi

3.6.1 Problemin Tanımı ve Çözüm Yöntemi

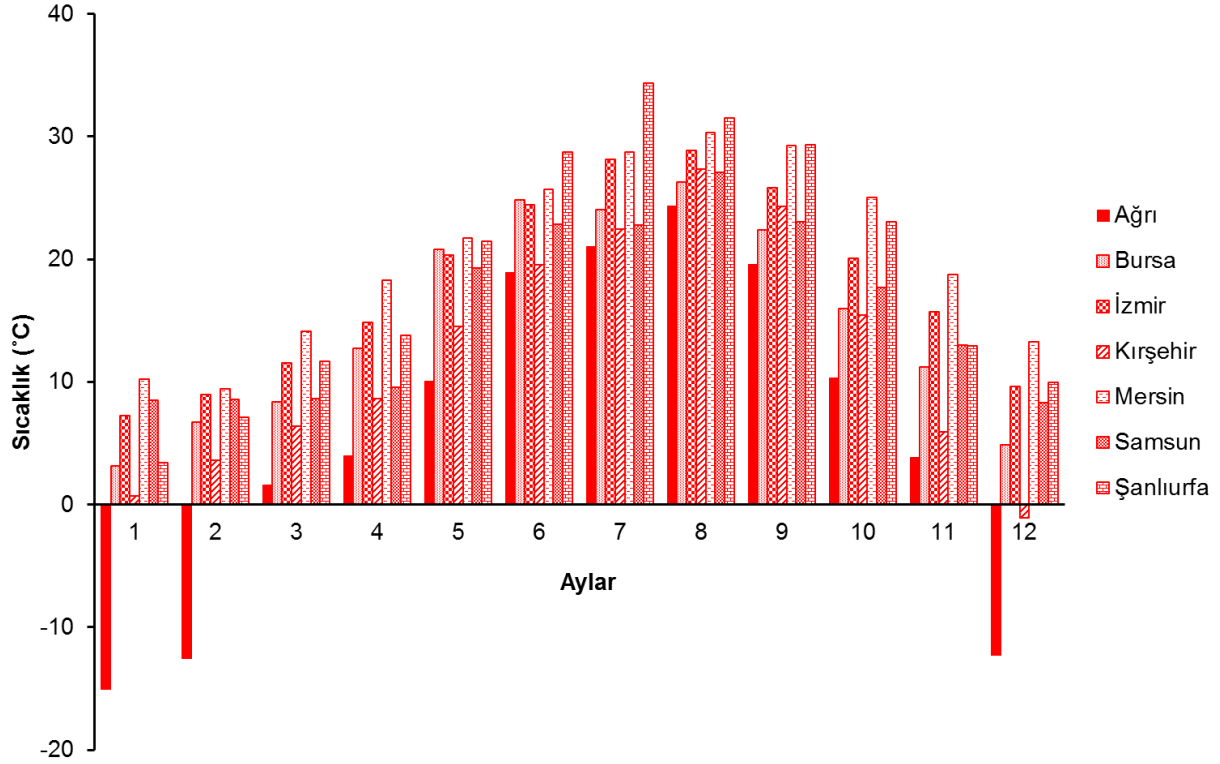
Projenin bu kapsamında Türkiye'nin 7 farklı coğrafi bölgesine ait güneş enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesi için sayısal çalışmalar yürütülmüştür. Ülkemiz bazında PV panelin elektrik üretim verimliliğini analiz etmek için farklı iklim kuşaklarını temsil etmek üzere Ağrı, Bursa, İzmir, Kırşehir, Mersin, Samsun ve Şanlıurfa illeri seçilmiştir. Seçilen illere ait düşey yüzeye gelen güneş ışınımı miktarları Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi interaktif haritası (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis>) kullanılarak türetilmiştir. Dış ortam sıcaklığı değerleri ise Türkiye Meteorolojik Veri Arşiv Sistemi'nden (TÜMAS) temin edilmiştir. C++ programlama dilinde PV/FDM sistemine ait bir-boyutlu matematiksel model oluşturulmuştur. RT28HC, RT31, RT35HC, RT42 ve RT44HC olmak üzere beş farklı tip faz değişim malzemesi, PV panel pasif ısı kontrolcüsü olarak denenmiştir. Bu malzemelere ait termofiziksel özellikler RUBITHERM ticari firmasının katalog değerlerinden elde edilmiştir. Malzemelerin yıl boyunca PV panel hücre sıcaklığına ve elektrik üretimine yönelik performansları incelenmiştir. Kalınlıkları 1-3 cm aralığında değiştirilerek optimum malzeme kalınlığı belirlenmiştir.

Şekil 3.10'da seçilen illere ait yıllık maksimum güneş ışınımı değerleri verilmektedir. Güneşin konumu sebebiyle sonbaharda, bina yan duvarlarına entegre edilen PV panele gelen güneş ışınımı, çatıya monte edilmiş panele oranla daha fazladır. Yaz aylarında ise çatıya montelenen PV panel, bina duvarına entegre edilmiş panele göre daha fazla güneş ışınımı almaktadır. İncelenen sistemin binaya entegre PV panel olduğu göz önüne alınırsa, tüm iller için yıl boyunca alınan maksimum güneş ışınımının sonbahar aylarında gözlenmektedir. İller bazında maksimum güneş ışınımı miktarları incelendiğinde ise, yüksek güneşlenme bölgesinde bulunan Ağrı, İzmir, Mersin ve Şanlıurfa illerinde diğer illere kıyasla PV panel yüzeyine etkiyen yıllık güneş ışınımı miktarları yüksektir.



Şekil 3.10. Seçilen illere ait yıllık maksimum güneş ışınımı değerleri

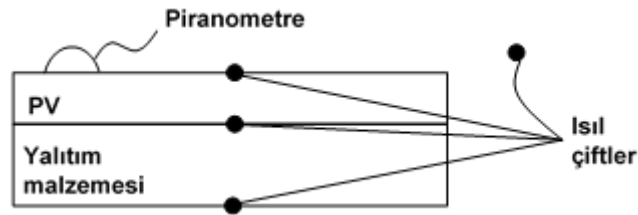
Şekil 3.11'de ise bu illere ait yıllık maksimum dış ortam sıcaklığı değerleri verilmiştir. Beklendiği gibi, en yüksek dış ortam sıcaklığı değerleri tüm iller için yaz aylarındadır. Ağrı, Bursa, Kırşehir ve Samsun illeri soğuk iklim, İzmir, Mersin ve Şanlıurfa illeri ise sıcak iklim bölgeleri olarak değerlendirilmişlerdir. Analizlerde ışınım miktarı ve dış ortam sıcaklığı değerlerinin yanı sıra bu illere ait ortalama rüzgar hızı değerleri de göz önünde bulundurulmuştur. Meteorolojik Veri İşlem Dairesi Başkanlığı-İstatistik Birimi'nden sağlanan verilere göre Ağrı, Bursa, İzmir, Kırşehir, Mersin, Samsun ve Şanlıurfa illerine ait ortalama rüzgar hızı değerleri sırasıyla 1,5, 2,0, 2,5, 2,5, 2,0, 2,0 ve 1,5 m/s olarak alınmıştır.



Şekil 3.11. Seçilen illere ait yıllık maksimum dış ortam sıcaklığı değerleri

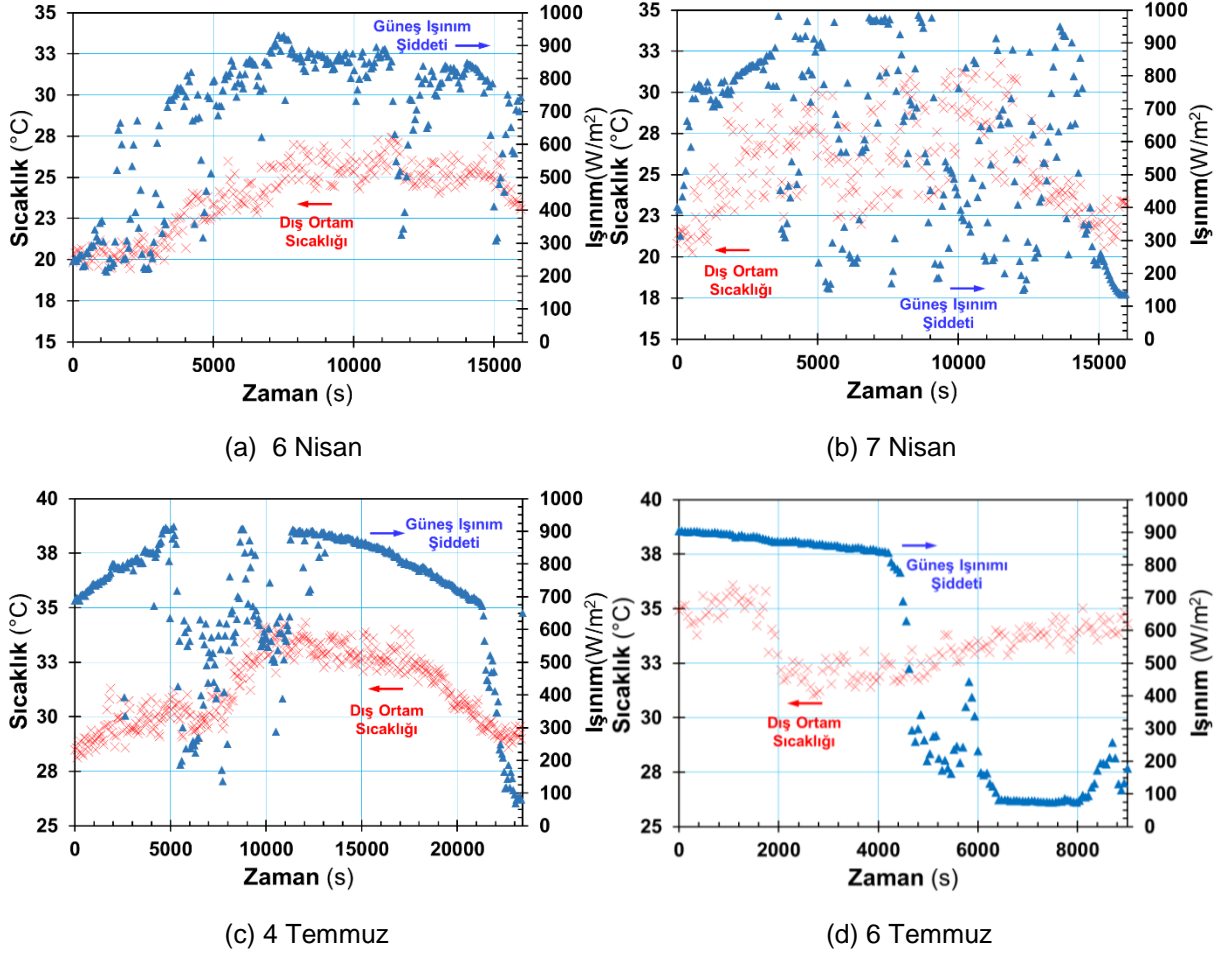
3.7 Ön Deneysel Çalışmalar

PV panelin gerçek iklim koşullarındaki ısıl davranışını ve güç üretimi miktarını saptayabilmek için, 6 Nisan, 7 Nisan, 4 Temmuz ve 6 Temmuz 2017 tarihlerinde Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü'nde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sistemde PV ön ve arka yüzeylerine, yalıtım malzemesinin arkasına ve dış ortama açık olacak şekilde ısıl çiftler yerleştirilerek sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Bu ısıl çiftlerin yerleşimi Şekil 3.12'de verilmektedir.



Şekil 3.12. Isıl çift yerleşimi

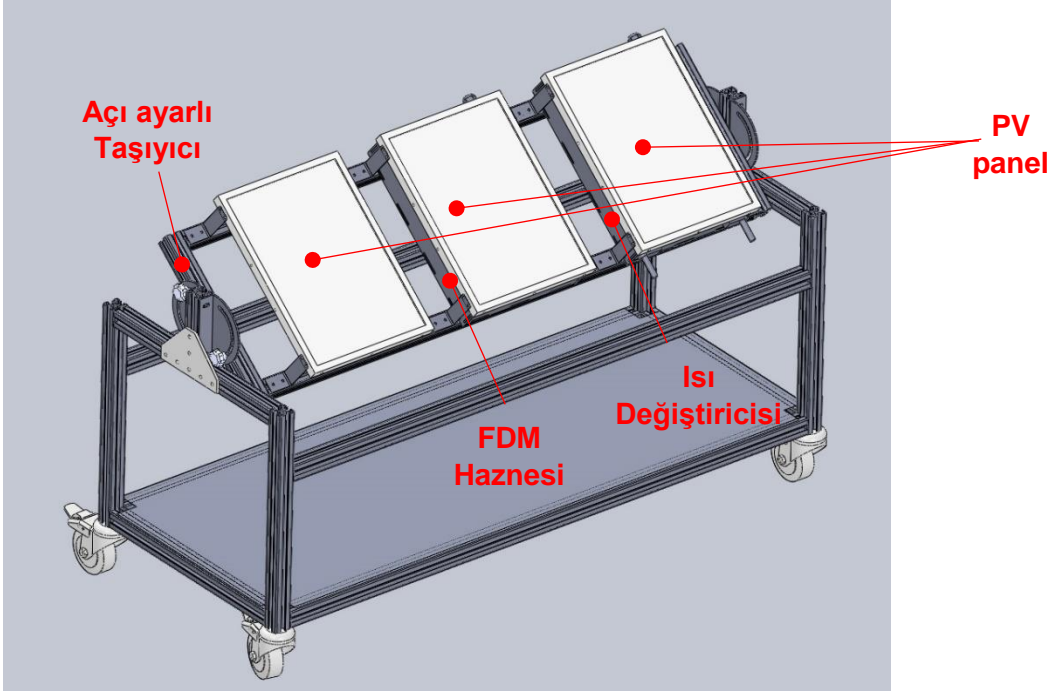
Ayrıca PV yüzeyine gelen güneş ışınımı şiddeti piranometre yardımıyla ölçülerek sayısal çözümlerde sınır koşulu olarak kullanılmıştır. Deney yapılan 4 gün için ölçülen dış ortam sıcaklığı ve güneş ışınım şiddeti değerleri Şekil 3.13'te verilmektedir.



Şekil 3.13. Deney günlerindeki güneş ışınım şiddetinin ve dış ortam sıcaklığının değişimi

3.8 PV ve PV/FDM Test Düzeneği Tasarımı ve İmalatı

PV, PV/FDM ve PV/T sistemlerine ait performans deneylerini tek bir sistem üzerinden gerçekleştirmek için Şekil 3.14'te tasarım resimleri verilen test düzeneği oluşturulmuştur. Sistem üzerine etkiyen güneş ışınımı pironometre ile okunabilmektedir. PV panelin üst ve alt yüzey sıcaklıkları, yüzeyler üzerine yerleştirilen T-tipi ısı çiftler yardımıyla istenen zaman adımıyla bilgisayara aktarılabilir. Bunun yanı sıra PV panellerin güç çıktıları oluşturulan basit bir yük devresi ile anlık olarak okunabilmekte ve bilgisayar ortamında depolanabilmektedir. Sistemin veri depolama sistemine ait ön testler gerçekleştirilmesine rağmen mevsim şartlarından dolayı FDM etkisinin gözlenebileceği deneyler proje kapsamında yürütülemedi. Proje kapsamında edinilen tecrübeler ve bilimsel kazanımlar doğrultusunda deney sisteminden elde edilecek çıktıların sayısal kod ile elde edilen sonuçlarla mukayese edilmesi ve bilimsel çalışmalar ile sonuçların paylaşılması planlanmaktadır.



(a) Tasarım



(b) İmalat

Şekil 3.14. Deneysel test düzeneği (a) Tasarım (b) İmalat

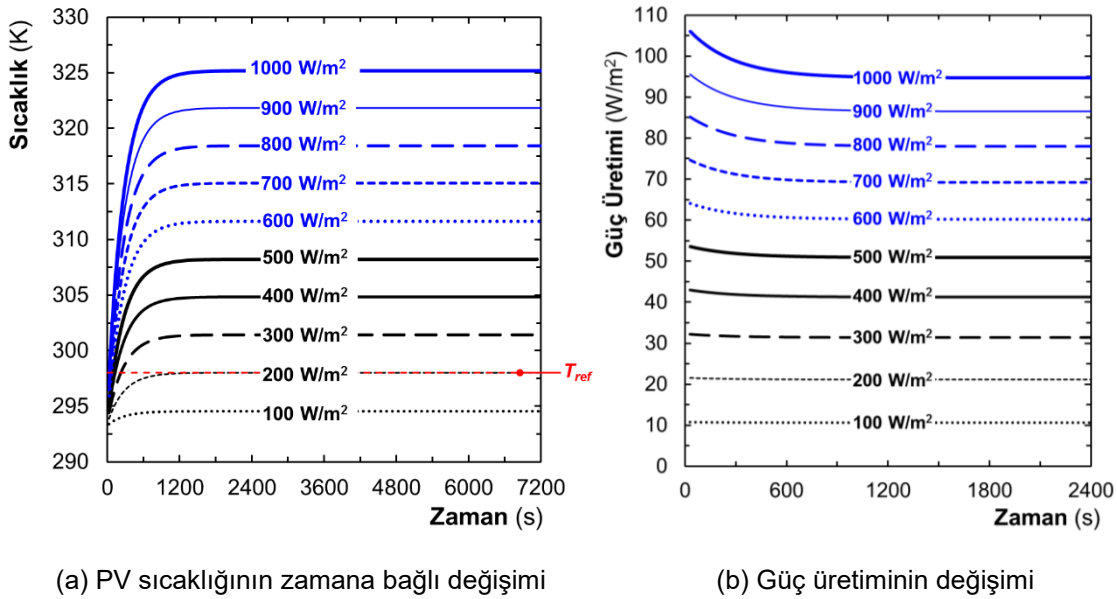
4 BULGULAR

4.1 Referans PV Analizleri

Bu kısımda sonuçlar sabit ve değişken güneş ışınımı olmak üzere iki farklı alt kısımda sunulmuştur. Değişken güneş ışınımı kısmında İzmir iline ait meteorolojik veriler kullanılmıştır.

4.1.1 Sabit Güneş Işınımı Analizleri

Analizler 100 ila 1000 W/m² arasındaki farklı sabit ışınım değerleri için gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1(a)'da fotovoltaik panelin zamana bağlı sıcaklık değişimi verilmiştir. Artan güneş ışınımı şiddetiyle birlikte PV'nin sıcaklığının arttığı ve yüksek ışınım şiddetlerinde kararlı duruma ulaşma sürelerinin uzadığı görülmektedir. Minimum ve maksimum ışınım şiddeti değerleri için kararlı durumdaki PV sıcaklıkları sırasıyla 294,59 K ve 325 K olarak bulunmuştur. Şekil 4.1(b) ise farklı ışınım şiddetlerinde panelden elde edilen güç üretiminin zamana bağlı değişimi verilmiştir. Düşük ışınım değerleri için güç üretiminin sabit olduğu görülmektedir. Işınım şiddetinin artmasıyla birlikte artan panel sıcaklığından dolayı güç üretimi miktarı zamana bağlı farklılaşmaktadır. Panel sıcaklığının referans değerinin altında olduğu başlangıç zamanlarında yüksek miktarda güç üretilirken, panel sıcaklığının artmasıyla birlikte güç üretimi asimptotik olarak azalmakta ve sürekli rejim değerinde sabitlenmektedir. Tablo 4.1'de farklı ışınım şiddetine karşılık elde edilen panel verimleri sunulmaktadır. Cam ve panele ait ışınım özelliklerinden (*geçirgenlik* ve *yutma*) dolayı en düşük ışınım yoğunluğunda panel veriminin %10,74 seviyesine düştüğü görülmektedir. Işınım şiddetinin artmasıyla artan panel sıcaklığı verimi %9,47'ye düşürmektedir.



Şekil 4.1. PV panelin zamana bağlı sıcaklık ve güç üretimi değişimi

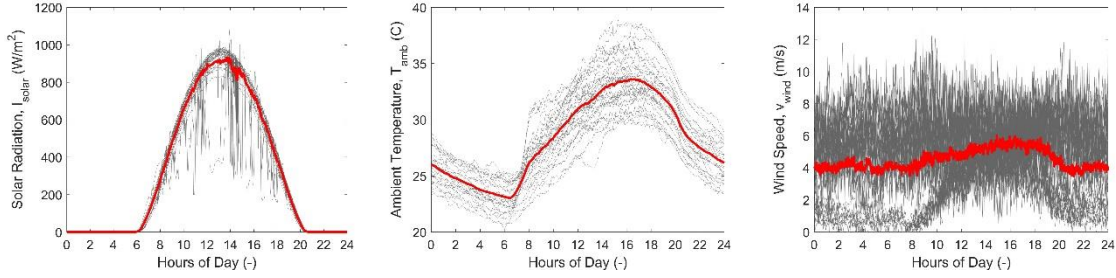
Tablo 4.1. Sürekli Rejim Panel Verimleri

Işınım Şiddeti (W/m ²)	Verim (%)
100	10,74
200	10,60
300	10,46
400	10,32
500	10,18
600	10,03
700	9,89
800	9,75
900	9,61
1000	9,47

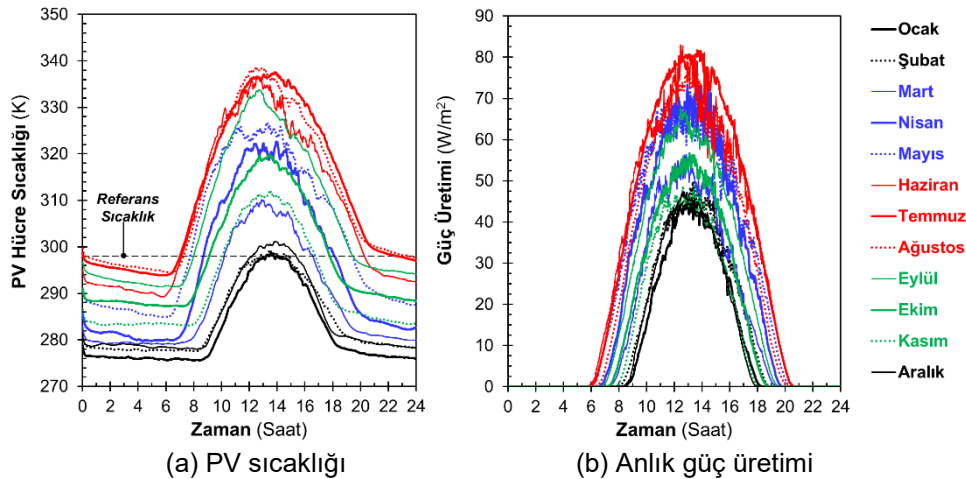
4.1.2 Değişken Dış Ortam Koşulları Analizleri

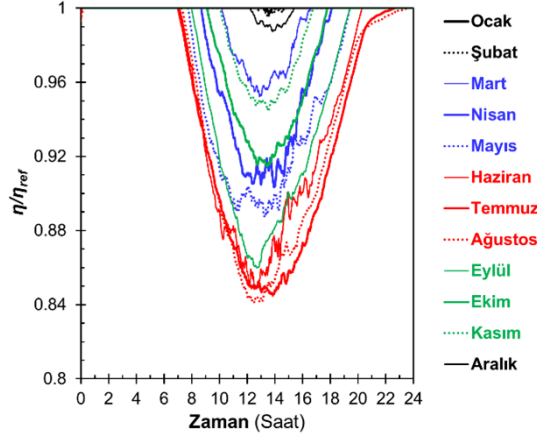
Projenin bu aşamasında gerçekleştirilen referans PV analizlerinde İzmir iline ait meteorolojik veriler kullanılmıştır. Yıl boyunca Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü meteoroloji istasyonunda ölçülen dakikalık güneş ışınımı, ortam sıcaklığı ve rüzgâr hızı verileri aylık ortalama değerlere indirgenmiştir. Şekil 4.2’de örnek olarak Temmuz ayına günlük değişimler ve aylık ortalama eğriler verilmiştir. İzmir ili iklim koşullarında, güneş ışınımı şiddeti kış aylarında (Aralık, Ocak ve Şubat) en fazla 400 W/m² ile 500 W/m² aralığında değişmektedir. Bu aylarda dış ortam sıcaklığı ise 5°C ile 10°C arasındadır. Düşük ışınım şiddeti ve dış ortam sıcaklığından dolayı bu aylarda PV sıcaklığının referans değere yakın sıcaklıklarda kalabileceği öngörülebilir. Diğer taraftan ilkbahar aylarında (Mart, Nisan ve Mayıs) ortalama güneş ışınımının en yüksek değeri 800 W/m² civarına kadar yükselmektedir. Kış aylarında 5 m/s civarında gözlenen rüzgâr hızının ise ilkbaharda ortalama olarak 2,5 ile 4 m/s arasında değişmektedir. Kışın dış ortam sıcaklığı ortalama 5°C ile 10°C arasında değişirken, ilkbaharda en düşük ve en yüksek sıcaklıklar ortalama 0°C ile 25°C arasındadır. Dış ortam sıcaklığının PV’nin referans çalışma sıcaklığına yaklaşması, azalan rüzgâr hızı ve artan güneş ışınımından dolayı ilkbaharda PV güç üretiminde ısınma kaynaklı verim düşüşü beklenmektedir. Sonbahar dönemine ait meteorolojik veriler ilkbahara benzediğinden benzer çıkarımlar bu aylar için de yapılabilir. Yaz aylarında ise hem güneş ışınımı hem de dış ortam sıcaklığı en yüksek değerlerine ulaşmaktadır. PV üzerine etki eden ısı yükünün artmasıyla birlikte bu aylarda aşırı ısınma kaynaklı yüksek verim kayıpları söz konusu olacaktır. Meteorolojik veriler üzerinden yapılan bu değerlendirmeye göre PV verim kaybını azaltmak için yaz aylarında bir ısı kontrolcünün kullanılması gerektiği görülmektedir. Dış ortam koşullarının dinamik yapısı nedeniyle uygulanacak ısı kontrolcünün de zamana bağlı ve parametrik olarak incelenmesi gerekmektedir. Bu kısımda oluşturulan matematiksel modelde dakikalık ortalama güneş ışınımı, sıcaklık ve rüzgâr hızı verileri kod içerisine aktarılmaktadır. Farklı mevsim koşullarında PV’nin zamana bağlı analizleri gerçekleştirilerek maksimum panel sıcaklıkları elde edilmiştir.

Elde edilen anlık ve ortalama sonuçlardan yola çıkarak ilerleyen bölümlerde kullanılan faz değişim malzemeleri belirlenmiştir.



Şekil 4.2. İzmir iline ait Temmuz ayı aylık ortalama güneş ışınımı, ortam sıcaklığı ve rüzgâr hızı verileri. Aylık ortalama dış ortam verileri kullanılarak 12 ay için zamana bağlı analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.3'te PV sıcaklığı, güç üretimi ve verim oranının gün boyunca değişimleri sunulmaktadır. Şekil 4.3(a) incelendiğinde, Ocak ve Şubat ayları için PV sıcaklığının referans çalışma sıcaklığının altında kaldığı görülmektedir. Bu nedenle, bu iki ay için ısınma kaynaklı bir verim düşüşü olmadığı söylenebilir. Kasım ve Mart ayları için ise PV hücre sıcaklığı referans sıcaklığın 10 K üzerine kadar çıkmaktadır. Yaz aylarında ise maksimum PV sıcaklığı referans değerin 40 K kadar üzerine çıkmıştır. Şekil 4.3(b)'de görüldüğü gibi en yüksek güç üretimi, güneş ışınımının yoğun olduğu yaz ve ilkbahar aylarında elde edilmektedir. Yaz aylarında maksimum güç üretimi 80 W/m^2 iken kış aylarında maksimum değer 45 W/m^2 civarına düşmektedir. Şekil 4.3(c) ise anlık verimin referans verime oranını sunmaktadır. Ocak ve Şubat aylarında panel veriminin referans verimle aynı olduğu görülmektedir. Güç üretim değerleri yaz aylarında yüksek olmasına rağmen verimin önemli ölçüde düştüğü Şekil 4.3(c)'de görülmektedir. Yaz aylarında dış ortam sıcaklığının referans sıcaklıktan yüksek olması nedeniyle güneş ışınımının aktif olduğu saat diliminin tamamında verim değeri referans verimin altında kalmaktadır. Verim oranı en düşük 0.84 seviyesine düşmektedir. Bir diğer deyişle İzmir ili için mevcut PV sisteminin verimindeki azalma maksimum %16'ya ulaşmaktadır.

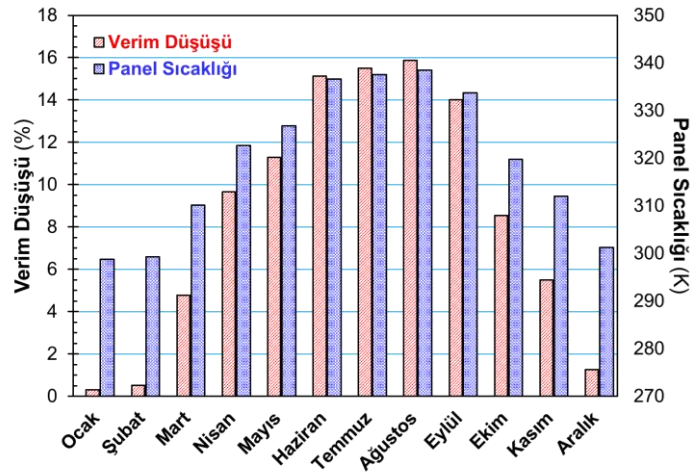




(c) Verim oranı

Şekil 4.3. İzmir ili için referans PV sıcaklığı ve anlık güç üretimindeki değişim

Aylar bazında maksimum panel sıcaklığı ve verimdeki yüzde azalma değişimleri ise Şekil 4.4'te sunulmaktadır. Kış aylarında (Aralık, Ocak ve Şubat) maksimum panel sıcaklığının 300 K civarında olduğu görülmektedir. Panel sıcaklığının referans sıcaklığa yakın olduğu bu aylarda verimdeki azalma düşük seviyelerdedir. Örneğin Aralık ayında verim kaybı en fazla %1,5'tir. Diğer taraftan Mart, Nisan ve Mayıs gibi dış ortam sıcaklığının yükseldiği bahar aylarında maksimum panel sıcaklığının arttığı ve buna bağlı olarak verimde belirgin bir azalmanın meydana geldiği görülmektedir. Mayıs ayı için verimdeki azalma %11 civarındadır. Yaz aylarında ise (Haziran, Temmuz ve Ağustos) panel sıcaklıkları 330 K üzerine çıkarak yıl içindeki en yüksek değerlere ulaşmıştır. Her üç ay için de verimdeki düşüş %15 seviyesinde olup Ağustos ayı için %16'ya ulaşmıştır. Sonbahar döneminde panel sıcaklıklarında hızlı bir azalma meydana gelirken Kasım ayı için verim düşüşü %5 seviyesine kadar inmiştir.



Şekil 4.4. İzmir ili aylık maksimum panel sıcaklığı ve verim düşüşü

4.2 Etkin Isı İletim Katsayısının Elde Edilmesi

Literatürdeki etkin ısı iletim katsayısı korelasyonları incelendiğinde, sunulan bağıntıların Rayleigh ve görünüm oranına ($AR = H/W$) bağlı olarak aşağıdaki formda tanımlandığı görülmektedir (Bejan, 2013; Çengel & Ghajar, 2011),

$$Nu_w = CRa_w^m Pr^n (H/W)^q \quad (4.1)$$

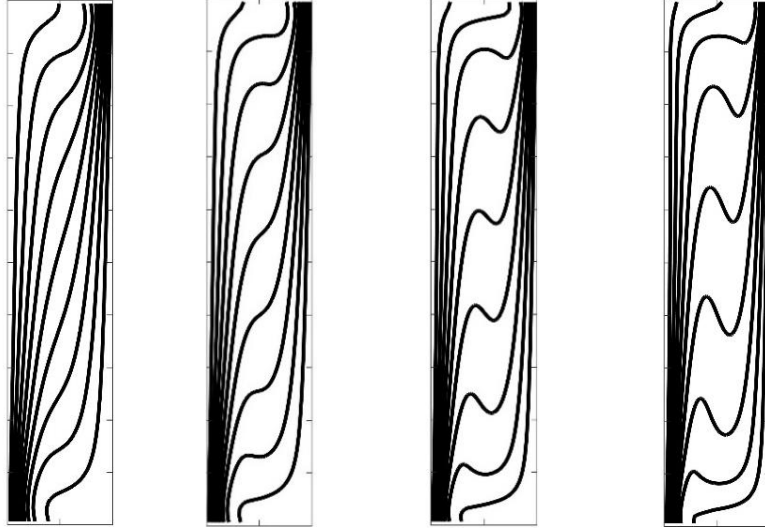
Çalışmada tek bir akışkan için (*parafin*) etkin ısı iletim katsayısı bağıntısı elde edildiğinden, Eşitlik 4.1'deki Prandtl sayısının denklem içerisinde belirtilmesine gerek yoktur. İçe doğru ergimenin farklı aşamalarına karşılık gelecek şekilde çeşitli H/W oranları ve sıcaklık farkları için toplamda 49 analiz gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kavitenin boyu 0,03 m alınarak kavitenin genişliği değiştirilmiştir. İncelenen parametreler ve bu parametrelere karşı elde edilen k_{eff} değerleri Tablo 4.2'de kısaca verilmektedir. Her bir durum için yüzeylerdeki ortalama ısı transferi elde edilerek Eşitlik 3.11 yardımıyla etkin ısı iletim katsayıları elde edilmiştir.

Tablo 4.2. Etkin ısı iletim katsayısı analiz parametreleri

AR	H	W	ΔT Değişimi	k_{eff} Değişimi
30	0,03	0,001	2-16	0,20
20	0,03	0,0015	0,1-32	0,20 - 0,22
15	0,03	0,002	0,1-32	0,20 - 0,23
12,5	0,03	0,0024	0,1-16	0,20 - 0,22
10,5	0,03	0,002857	0,1-16	0,20 - 0,24
10	0,03	0,003	0,1-64	0,20 - 0,33
9,5	0,03	0,003158	0,1-50	0,20 - 0,33
9	0,03	0,003333	0,1-50	0,20 - 0,35
8,5	0,03	0,003529	0,1-40	0,20 - 0,36
8	0,03	0,00375	0,1-49	0,20 - 0,40
7,5	0,03	0,004	0,1-32	0,20 - 0,40
7	0,03	0,004286	0,1-32	0,20 - 0,43
6,5	0,03	0,004615	0,1-26	0,20 - 0,45
6	0,03	0,005	0,1-21	0,20 - 0,47
5,5	0,03	0,005455	0,1-16	0,20 - 0,49
5	0,03	0,006	0,1-12	0,20 - 0,51

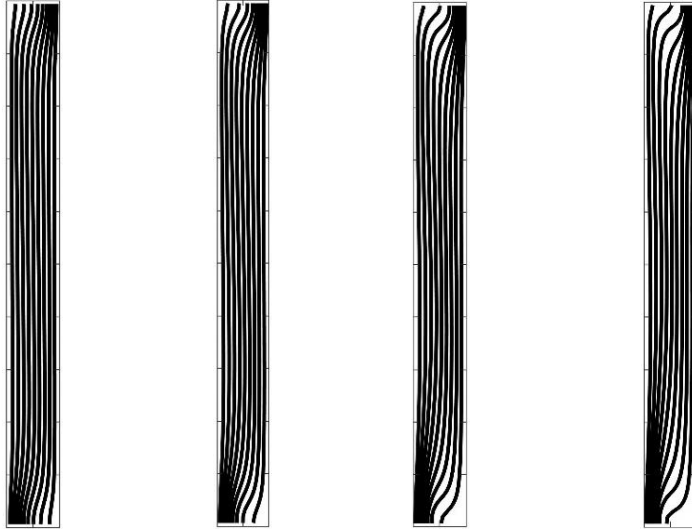
Şekil 4.5'te seçilen iki farklı görünüm oranına ait eş sıcaklık eğrileri değişen sıcaklık farkları için sunulmaktadır. Görünüm oranının küçük olduğu değerde ($AR = H/W = 5$) artan sıcaklık farkı ile birlikte doğal taşınım etkisinin belirgin hale geldiği görülmektedir. Özellikle $\Delta T = 8^\circ C$ ve $\Delta T = 12^\circ C$ için sıcak ve soğuk yüzey üzerinde oluşan sınır tabakalar birbirine çok

yaklaşmıştır. Bu nedenle, doğrulama analizlerinde değinilen ısı tabakalaşma bölgesi oluşmamaktadır. Artan görünüm oranı değeri için ($AR = H/W = 10$) aynı sıcaklık farklarında çok daha zayıf doğal taşınım hareketliliği gözlenmektedir. Düşük sıcaklık farkları için ($\Delta T = 2^\circ\text{C}$ ve $\Delta T = 4^\circ\text{C}$) eş sıcaklık eğrileri üst ve alt yüzeye yakın bölgeler dışında dik oluşmaktadır. Artan sıcaklık farkıyla birlikte kavitenin sağ üst ve sol alt bölgelerinde eş sıcaklık eğrilerinin sıklaştığı ve bu bölgelerde sınır tabakaların oluştuğu görülmektedir.



(a) $\Delta T = 2^\circ\text{C}$ (b) $\Delta T = 4^\circ\text{C}$ (c) $\Delta T = 8^\circ\text{C}$ (d) $\Delta T = 12^\circ\text{C}$

(i) $AR = 5,0$



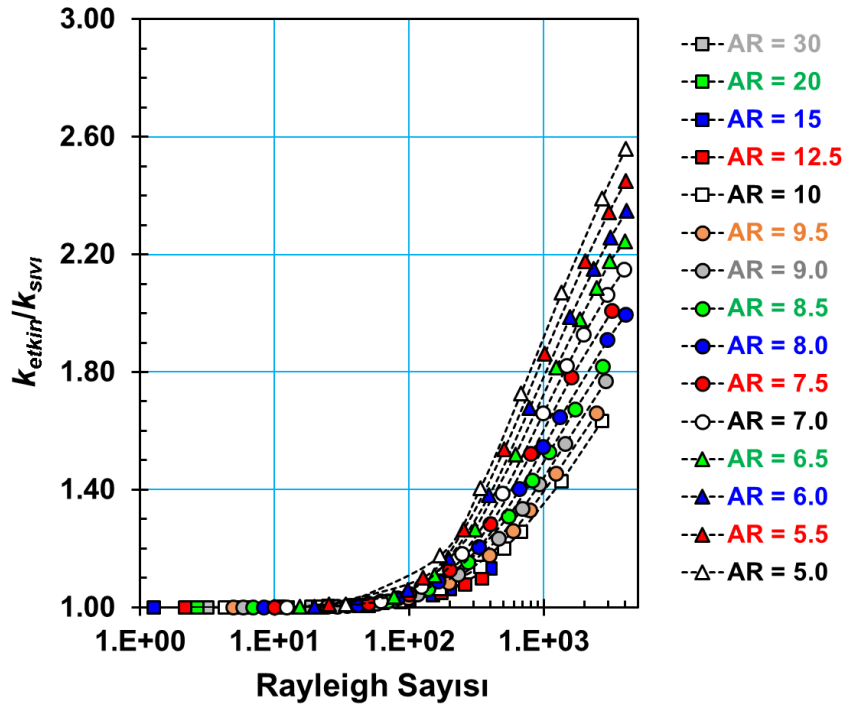
(a) $\Delta T = 2^\circ\text{C}$ (b) $\Delta T = 4^\circ\text{C}$ (c) $\Delta T = 8^\circ\text{C}$ (d) $\Delta T = 12^\circ\text{C}$

(ii) $AR = 10,0$

Şekil 4.5. Farklı konfigürasyonlar için eş sıcaklık eğrileri

Farklı kavite görünüm oranları ve Rayleigh sayıları için gerçekleştirilen analizler sonucu elde edilen etkin ısı iletim katsayısı değerleri Şekil 4.6'da sunulmaktadır. Düşük Rayleigh sayıları

için, $1 < Ra_W < 100$ aralığında, $k_{etkin}/k_{sivi} \approx 1$ 'dir. Buna göre görünüm oranından bağımsız olarak $Ra_W < 100$ için kavite içerisinde baskın ısı transfer mekanizmasının iletim olduğu anlaşılmaktadır. Artan Rayleigh değerlerinde ise kavite içerisinde oluşan doğal taşınım hareketliliği nedeniyle ısı transfer hızı artmakta ve k_{etkin}/k_{sivi} oranı yükselmektedir. Seçilen parametreler için en yüksek etkin ısı iletim katsayısı değeri $AR = 5$ görünüm oranında elde edilmiştir. Görünüm oranının artırılmasıyla kavite içerisindeki taşınım sınırlandığından etkin ısı iletim katsayısı da azalmaktadır. En yüksek Rayleigh değeri için $AR = 5$ ile $AR = 10$ görünüm oranlarında elde edilen etkin ısı iletim katsayıları arasındaki fark %55 civarındadır. Elde edilen bulgulara göre, taşınım etkisiyle kavite içerisinde oluşan ısı geçişi iletime göre 2,5 kat kadar artabilmektedir. Bu nedenle, belirli çalışma parametrelerinde ısı taşınımını dâhil etmeden yapılacak sayısal modellemelerde önemli ölçüde hataların oluşması kaçınılmazdır.

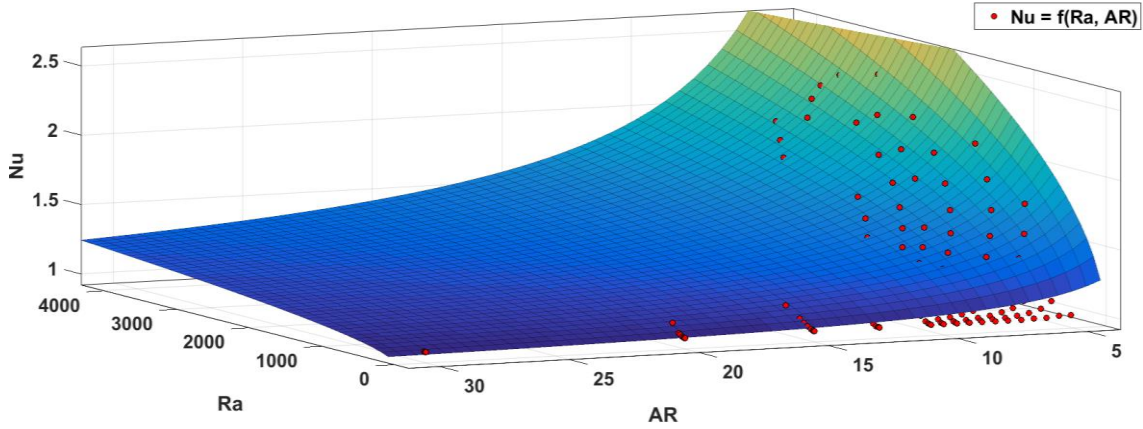


Şekil 4.6. Etkin ısı iletim katsayısının Rayleigh ve görünüm oranına bağlı değişimi

Analizler sonucunda Rayleigh sayısına ve görünüm oranına bağlı olarak etkin ısı iletim katsayısı (veya Nusselt sayısı) değişimleri elde edilmiştir. Etkin ısı iletim katsayısı bağıntısı türetmek için sonuçlar "MATLAB-Curve Fitting Tool" programına aktarılmıştır. Şekil 4.6'da iki boyutlu düzlem üzerinde gösterilen eğriler birleştirilerek bir yüzey elde edilmiştir (Şekil 4.7). Eşitlik 4.1'deki genel Nusselt bağıntısı formundan yola çıkılarak aşağıdaki korelasyon türetilmiştir:

$$Nu = \frac{k_{eff}}{k_{sivi}} = 0.9293 + 0.1219Ra^{0.5123} (H/W)^{-0.971} \quad (4.2)$$

Önerilen denklem için $R^2 = 0,9811$ ve RMSE (Root-Mean-Square-Error) = 0,05788 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Nusselt sayısının Rayleigh ve görünüm oranına bağlı değişimi

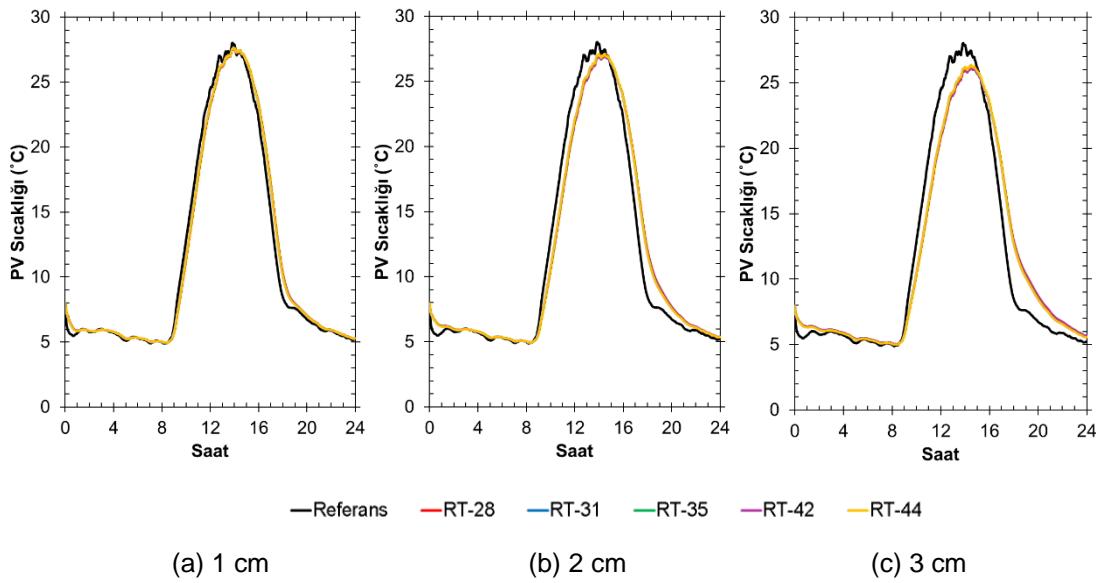
Sonuç olarak, bu bölümde düzlemsel bir kavite içerisindeki parafinin doğal taşınımı farklı konfigürasyonlar ve sıcaklık farkları için incelenmiş ve doğal taşınım etkisini ifade eden etkin ısı iletim katsayısı korelasyonu türetilmiştir. Önerilen bağıntı PV panel arkasına yerleştirilen FDM kavitesi içerisindeki 1-boyutlu faz değişim modelinde kullanılarak ısı geçişindeki artışın sayısal modele dâhil edilmesinde kullanılabilir.

4.3 PV/FDM Sistemi Analizleri

PV/FDM sisteminin ısıl davranışı İzmir ili iklim koşullarında yıl boyunca incelenmiştir. Bu bölümde her bir mevsimi uygun şekilde temsil eden aylar seçilerek 4 farklı iklim koşulundaki PV sıcaklığının zamana bağlı değişimi verilmiştir.

Kış ayları için PV yüzeyine etki eden güneş ışınımı miktarının ve dış ortam sıcaklığının düşük olması nedeniyle PV sıcaklığının panel referans çalışma sıcaklığı (veya maksimum verim noktası) civarında olacağı beklenmektedir. Aralık, Ocak ve Şubat ayları için gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda referans PV (FDM içermeyen PV) için maksimum sıcaklık değeri en düşük ergime sıcaklığına sahip RT28'in faz değişim sıcaklığından daha düşük çıkmıştır. Şekil 4.8'de kış aylarını temsilen sadece Aralık ayına ait sonuçlar sunulmaktadır. 1 cm FDM kullanılması durumunda tüm FDM'ler için PV sıcaklığı referans PV sıcaklığına çok yakındır. Panel maksimum sıcaklığının ($T_{max} = 28^{\circ}\text{C}$) seçilen FDM'lerin faz değişimi sıcaklıklarından düşük veya eşit olması nedeniyle malzemelerde ergime gerçekleşmemiştir. Kış aylarında FDM içerisinde ısıl enerji sadece duyulur enerji formunda depolanabilmiştir. FDM içerisinde depolanabilecek duyulur ısıl enerji sıcaklık farkı ve malzeme kütlesiyle ilişkili olduğundan 1 cm kalınlıktaki FDM haznesine ait sonuçlar referans PV sonuçlarıyla neredeyse üst üste çıkmıştır (Şekil 4.8(a)). FDM kalınlığının 2 cm'ye artırılmasıyla PV sıcaklığının zamana göre değişiminde küçük bir bozulmanın olduğu ve eğrinin sağa doğru ötelendiği görülmektedir.

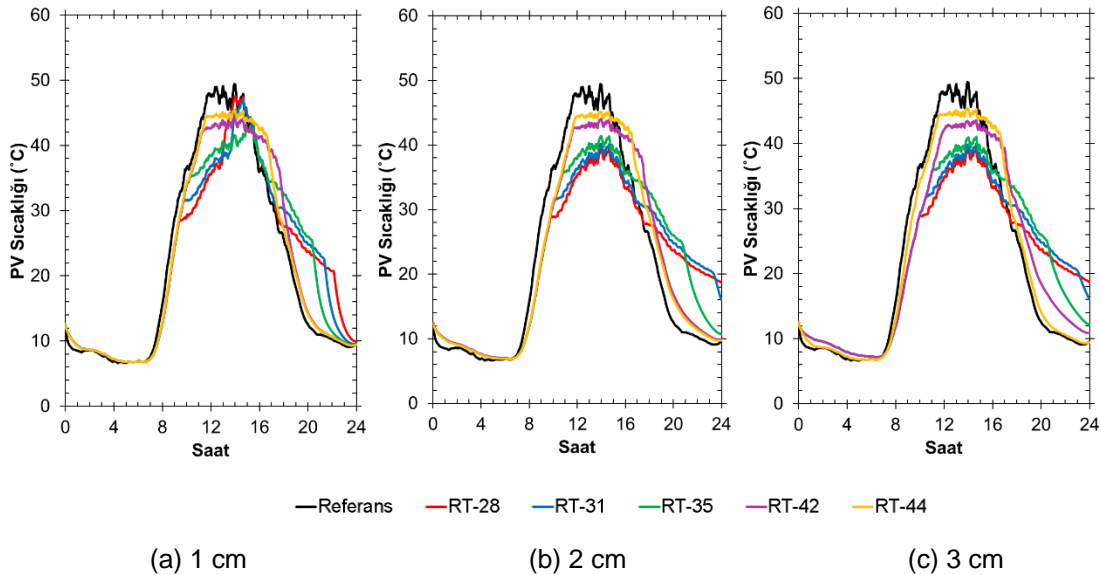
FDM'nin artan kütlesiyle birlikte PV/FDM sistemin ısı ataletinin (veya ısı enerji depolama yeteneğinin) artmasından dolayı PV sıcaklığının zamana göre değişimi etkilenmektedir. En yüksek FDM kalınlığı olan 3 cm için (Şekil 4.8(c)) PV sıcaklığında belirgin bir düşüş elde edilmiştir. PV'nin en yüksek sıcaklığı 26°C civarına inmiştir. Sonuç olarak kış aylarında 2 cm ve üzerindeki FDM kalınlıklarında malzemelerin duyulur ısı depolama özelliklerinden dolayı PV sıcaklıklarında azalma gözlenmiştir. FDM hazne sıcaklığının ergime sıcaklığına yükselmemesinden dolayı tüm FDM tipleri için benzer eğilimler elde edilmiştir. PV/FDM sistem kurulumu ve FDM maliyeti göz önüne alındığında, İzmir ilinde kış ayları için ısı kontrolcü kullanımının gerekli olmadığı sonucuna varılabilir.



Şekil 4.8. Aralık ayı için PV sıcaklığının zamana bağlı değişimi

Şekil 4.9'da İzmir ili ilkbahar mevsimi iklim koşullarında PV ve PV/FDM sistemlerine ait Nisan ayı sıcaklık değişimleri sunulmaktadır. Nisan ayında artan dış ortam sıcaklığı ve güneş ışınımı değerinden dolayı PV sıcaklığı 49°C'ye kadar ısınmaktadır. Yüksek panel sıcaklığına bağlı olarak farklı ergime sıcaklığındaki FDM uygulamaları için zamana bağlı sıcaklık değişimleri farklılık göstermektedir. 1 cm kalınlığında RT28 uygulanan durumda PV'nin ani sıcaklık artışı sönümlenmiş ve PV'nin maksimum sıcaklık noktası saat 14:00'a ötelenmiştir. PV üzerine etki eden ısı yükün fazla olmasından dolayı 1 cm kalınlığa sahip RT28 saat 12:00 itibariyle tamamen sıvı faza geçmiş ve kalan sürede duyulur olarak ısı depolamıştır. RT31 ile RT28'in sıcaklık değişimleri birbirine benzeşmektedir. Artan FDM kütlesiyle duyulur ve gizli ısı depolama kapasitesi yükseldiğinden 2 cm ve 3 cm kalınlıklarda RT28, RT31 ve RT35 kullanılan uygulamalarda sıcaklık-zaman eğrileri aşağı yönde ötelenmiştir. 2 cm ve 3 cm kalınlıklar için bu üç FDM tipinde de PV sıcaklığında 10°C civarında düşüş gözlenmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta 2 cm ve 3 cm kalınlıktaki FDM'ler için sonuçların birbirine yakın olmasıdır. Buradan yola çıkarak yüzeye etki eden ısı yüküne uygun

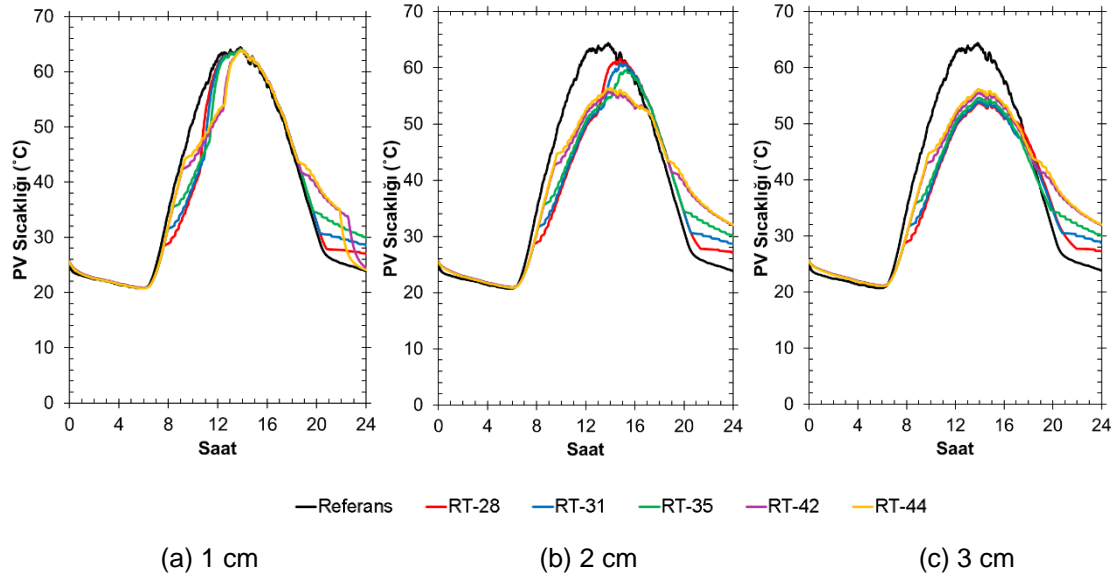
olarak Nisan ayında 2 cm kalınlığa sahip RT28, RT31 veya RT35'in uygun tercih olduğu söylenebilir. RT42 ve RT44 gibi yüksek ergime sıcaklığına sahip FDM'ler ise Nisan ayında kısmen faz değişimi gerçekleştirmektedir. Bu iki FDM'nin farklı kalınlıkları için PV sıcaklığının zamana göre değişiminde belirgin bir fark görülmemiştir. Bunun yanı sıra, PCM uygulamalarında akşam saatleri için PV sıcaklığının referans PV'ye göre daha yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Gün içerisinde FDM içerisinde depolanan gizli ısı, güneş ışınımı etkisini kaybettikten sonra PV üzerinden dış ortama aktarılmakta ve bu nedenle PV sıcaklığı referans çalışma durumuna kıyasla daha yüksek sıcaklıklara çıkmaktadır. Işınım etkisinin ortadan kalktığı saatlerde yüksek PV çalışma sıcaklığı PV güç üretiminde herhangi bir performans kaybına yol açmayacaktır. FDM haznesi içerisinde depolanan kullanılabilir ısı enerji farklı tip uygulamalar ile sistemden çekilerek mahal iç ortam ısıtmasında veya sıcak su temininde dahi kullanılabilir. PV/FDM sisteminde gece saatlerinde depolanan ısı enerji dış ortama atılamaz ise takip eden gün PV panelin sıcaklığı yüksek bir değerde güne başlar. Böylece sistem sıcaklığında sürekli bir artış meydana gelir. Bu nedenle PV/FDM sistemlerinde kullanılan FDM'nin gün içerisinde tamamıyla ergimesi, gece saatlerinde ise katı faza geçmesi sağlanmalıdır. Tek günlük analizler bu etkinin doğru bir şekilde sağlanıp sağlanmadığını belirlemek için yetersizdir. Bu bağlamda bu kısımda sunulan analizler birbirini takip eden üç gün için yapılmış ve sadece son güne ait dağılımlar sunulmuştur.



Şekil 4.9. Nisan ayı PV sıcaklığının zamana bağlı değişimi

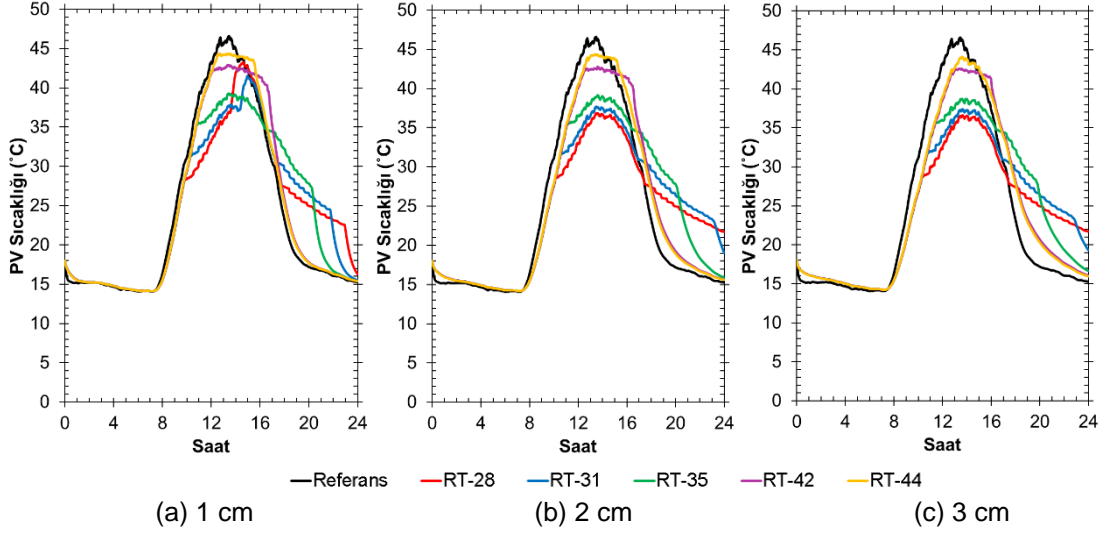
Yaz mevsimi iklim koşullarını temsilen seçilen Temmuz ayı için referans PV ve PV/FDM sistemlerine ait sıcaklık değişimleri Şekil 4.10'da sunulmaktadır. 1 cm kalınlığında FDM kullanılması durumunda malzeme tipinden bağımsız olarak tüm PV/FDM sistemlerinin öğlen 13:00 civarında referans PV sıcaklığına ulaştığı gözlenmektedir. FDM kalınlığının 2 cm'ye yükseltilmesiyle PV sıcaklığı daha uzun süre boyunca regüle edilebilmiş ve RT28, RT31 ve

RT35 için saat 16:00 civarına kadar PV/FDM sisteminin sıcaklığı referans PV sıcaklığının altında tutulmuştur. RT42 ve RT44 ise referans PV eğrisini aşağı yönde sönümleyerek en yüksek PV sıcaklığının 54°C civarında tutulmasını sağlamıştır. 3 cm FDM'in kullanıldığı durumda ise tüm malzeme tipleri için benzer dağılımlar elde edilmiştir. Sonuç olarak 2 cm ve 3 cm FDM kullanılan PV/FDM sistemlerinde Temmuz ayı için 10°C civarında sıcaklık düşüşü sağlanmıştır.



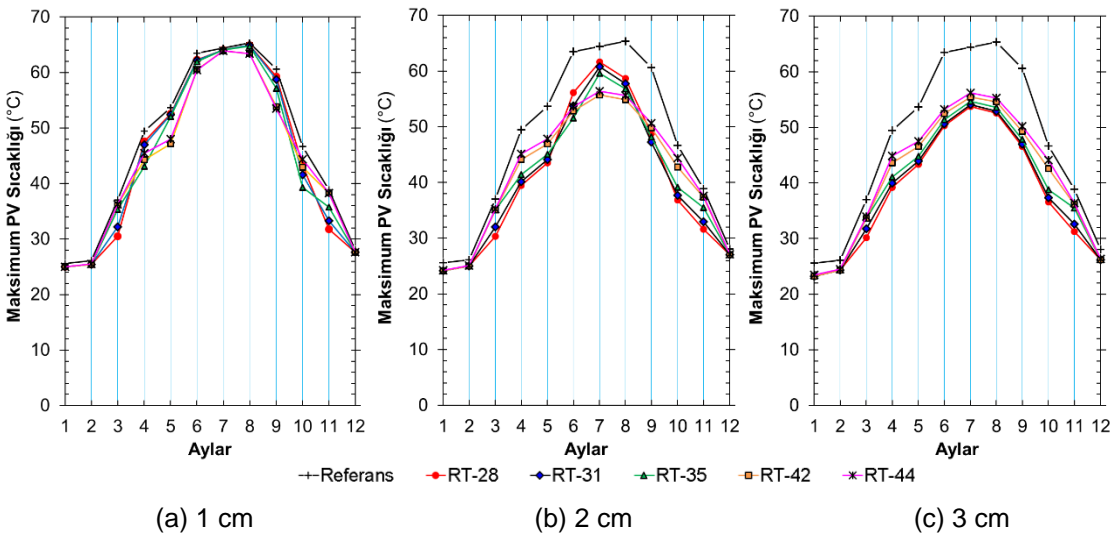
Şekil 4.10. Temmuz ayı PV sıcaklığının zamana bağlı değişimi

Sonbahar mevsimi iklim koşullarında PV sıcaklığının zamana bağlı değişimi Ekim ayı için Şekil 4.11'de verilmiştir. 1 cm FDM kullanılan PV/FDM sisteminde RT28 ve RT31 tipi FDM'ler saat 13:00 civarında tamamen erimiştir. RT42 ve RT44 uygulanan durumlarda ise, referans PV sıcaklığı maksimum 46°C civarına çıktığı için, yeterli iyileştirme gözlenememektedir. 1 cm kalınlıkta hazne kullanımı için en uygun FDM tipi RT35 olarak görülmektedir. 2 cm FDM uygulaması durumunda ise güneş ışınımının en şiddetli olduğu 12:00-16:00 zaman aralığında RT38, RT31 ve RT35 tipi FDM'ler PV sıcaklığını referans PV'ye göre yaklaşık 6°C ila 10°C aşağıda tutmayı başarmışlardır. 2 ve 3 cm FDM kullanılması durumları arasında belirgin bir fark olmaması nedeniyle FDM maliyeti göz önüne alınarak 2 cm kalınlığında FDM uygulanması Ekim ayı için önerilebilir.



Şekil 4.11. Ekim ayı PV sıcaklığının zamana bağlı değişimi

Anlık değişimlerden elde edilen aylık maksimum değerler referans PV ve farklı kalınlıklarda FDM içeren PV/FDM sistemleri için Şekil 4.12’de karşılaştırılmıştır. 1 cm kalınlığında FDM kullanılan PV/FDM sistemi sonbahar ve ilkbahar aylarında referans PV panele göre avantajlı görünmektedir. Ancak tüm yıl için performansı değerlendirildiğinde yeterli iyileşmeyi sağlayamadığı söylenebilir. 2 cm FDM uygulanan durumda ise özellikle Nisan-Eylül ayları arasında maksimum PV sıcaklığı referans PV sıcaklığının 5°C ila 10°C altına düşürülebilmektedir. İlkbahar ve sonbahar aylarında RT28, RT31 ve RT35 avantajlı durumdayken yaz aylarında RT42 ve RT44’ün daha iyi performans gösterdiği açıkça görülmektedir. 3 cm FDM uygulamasında ise özellikle yaz aylarında maksimum PV/FDM sıcaklığı ile referans PV sıcaklığı arasındaki fark 10°C’nin üzerindedir. Ancak Ocak-Nisan ve Ekim-Aralık ayları arasında 1-2°C gibi az miktarda sıcaklık düşüşleri gözlenmektedir. Şekil 4.12’den İzmir ili için kış aylarında FDM uygulamasına gerek duyulmayacağı, bahar aylarında 2 cm, yaz aylarında 3 cm FDM kalınlıklarının yeterli olduğu sonucu çıkarılabilir.



Şekil 4.12. Maksimum PV sıcaklığının yıllık değişimi

Şekil 4.12'den 1 cm FDM uygulamasının yeterince etkin olmadığı, 2 ve 3 cm uygulamalar arasında da belirgin farklar gözlenmediği sonucuna varılabilir. Bu nedenle optimum FDM kalınlığı 2 cm olarak düşünülebilir. Tablo 4.2'de referans PV sıcaklığı ile 2 cm FDM kullanılan PV/FDM sistemine ait maksimum sıcaklıklar karşılaştırılmıştır. 2 cm FDM uygulaması en belirgin olarak ilkbahar ve sonbahar mevsimlerinde etkili olmuştur. 1 cm uygulamasında olduğu gibi kış aylarında tüm FDM'lerde aynı oranda iyileştirme sağlanabilmiştir. Kış aylarında FDM kalınlığının 1 cm'den 2 cm'ye artırılmasıyla birlikte elde edilen sıcaklık düşümü artmaktadır. Ancak FDM maliyeti de göz önüne alındığında İzmir ilinde kış ayları için FDM uygulamasının gerekli olmadığı sonucuna varılabilir. Mart ayında RT28 ve RT31'in performansı diğer FDM'lere oranla çok daha iyidir. RT35 ve RT42 tipi FDM'ler Mart ayında aynı oranda sıcaklık düşümü sağlamışlardır. Nisan ayı incelendiğinde ise RT44 dışındaki tüm FDM'lerin %10'un üzerinde iyileştirme sağladığı görülebilir. RT28, RT31 ve RT35'in performansı bu ay için diğerlerine oranla daha iyidir. Mayıs ayı için ise Nisan ayına benzer şekilde ergime noktası düşük olan FDM'ler daha etkilidir. Haziran ayında dış ortam sıcaklığının artması sebebiyle ergime noktası düşük olan FDM'ler tamamen ergimektedir. Bu nedenle RT28, RT31 ve RT35 gibi FDM tipleri yeterli iyileştirme sağlayamamaktadır. Haziran ayı için RT35 %22,96 oranında sıcaklık düşümü sağlamıştır ve en etkili FDM tipi olarak öne çıkmaktadır. RT42 ve RT44 ise bu ay için kullanılabilir olup sırasıyla %20,12 ve %18,36 oranında sıcaklık düşüşü sağlamışlardır. Temmuz ayında ise hava sıcaklığının artması sebebiyle ergime noktası yüksek olan FDM'ler avantajlı duruma geçmiştir. Performans açısından en uygun FDM %15,58 oranında sıcaklık düşümü sağlayan RT42'dir. Ağustos ayı için RT35, RT42 ve RT44 PV sıcaklığını referans PV'ye oranla %15'in üzerinde düşürebilmişlerdir. Bu ayda tüm FDM'ler %10'un üzerinde düşüş sağlamışlardır. Eylül ayı için RT44 dışındaki tüm FDM'ler %20'nin üzerinde düşüş sağlamışlardır. RT31 %28,25 sıcaklık düşümüyle bu ay için en etkili FDM'dir. Ekim ayında ise RT28 en avantajlı FDM olup RT31 kullanılabilir olarak değerlendirilebilir. Ancak Ekim ayı için ergime noktası yüksek olan FDM'ler yeterli iyileştirme sağlayamamışlardır. Kasım ayında da RT28 ve RT31 en iyi performansı göstermişlerdir. Diğer FDM'ler bu ay için %10'un altında düşüş sağladıkları için elverişli olmadıkları sonucuna varılabilir.

Tablo 4.2. 2 cm FDM kullanılması durumunda PV sıcaklıkları

Aylar	Referans PV Sıcaklığı	RT28 % Değişim		RT31 % Değişim		RT35 % Değişim		RT42 % Değişim		RT44 % Değişim	
1	25,6	24,2	6,1	24,2	6,1	24,2	6,1	24,2	6,1	24,3	5,5
2	26,1	25,0	4,6	25,0	4,6	25,0	4,6	25,0	4,6	25,1	4,3
3	37,0	30,4	22,0	32,0	15,5	35,1	5,6	35,1	5,6	35,2	5,0
4	49,5	39,5	25,4	40,2	23,2	41,4	19,5	44,1	12,3	45,1	9,6
5	53,6	43,6	23,2	44,1	21,5	45,1	19,0	46,9	14,4	47,8	12,2
6	63,4	56,1	13,1	53,8	18,0	51,6	23,0	52,8	20,1	53,6	18,4
7	64,4	61,6	4,6	60,7	6,1	59,6	8,1	55,7	15,6	56,4	14,2
8	65,4	58,6	11,5	57,7	13,3	56,8	15,0	54,8	19,2	55,6	17,5
9	60,6	48,8	24,2	47,3	28,3	48,2	25,7	49,8	21,7	50,7	19,6
10	46,6	36,9	26,5	37,7	23,7	39,2	19,1	42,8	8,9	44,4	5,1
11	38,9	31,6	23,0	33,0	17,8	35,5	9,4	37,4	3,9	37,6	3,4
12	28,0	27,0	3,8	27,0	3,8	27,0	3,8	27,0	3,8	27,1	3,4

Tablo 4.3'te aylara göre performansı en iyi olan FDM uygulamaları listelenmiştir. Mart ayında RT28 tüm kalınlık uygulamalarında en avantajlı FDM'dir. Kalınlık arttırıldığında iyileştirme oranının artmasına rağmen FDM maliyeti de göz önüne alındığında 1 cm RT28'in Mart ayı için en uygun FDM tipi olduğu görülmektedir. Nisan ayı için ise en elverişli tasarımın 2 cm RT38 uygulaması olduğu görülmektedir. Mayıs ayı sonuçları incelendiğinde, 1 cm FDM kalınlığı için en avantajlı malzeme RT42 iken, hazne kalınlığı arttırıldığında RT28 daha uygun seçenek olmaktadır. Mayıs ayı için de Nisan ayına benzer şekilde en elverişli tasarım 2 cm kalınlığında RT28 kullanılmasıdır. Yaz ayları için 1 cm FDM uygulamaları yetersiz kalmıştır. 3 cm RT28 kullanılması yüksek maliyete rağmen tüm aylarda en uygun seçenek olacaktır. Eylül ve Ekim aylarında ise 3 cm FDM uygulamasının maliyeti göz önüne alındığında Eylül ayı için 2 cm RT31'i, Ekim ayı içinse 2 cm RT28'i kullanmak mantıklı olacaktır. Kasım ayında ise 1 cm RT28 PV sıcaklığını düşürmek için yeterli olacaktır.

Tablo 4.3. Aylara göre performansı en iyi FDM uygulamaları

Aylar	1 cm		2 cm		3 cm	
	FDM	% Değişim	FDM	% Değişim	FDM	% Değişim
1	RT44 dışındaki FDM'ler	2,57	RT44 dışındaki FDM'ler	6,06	RT44 dışındaki FDM'ler	10,28
2	RT44 dışındaki FDM'ler	2,66	RT44 dışındaki FDM'ler	4,56	RT44 dışındaki FDM'ler	7,31
3	RT28	21,47	RT28	21,95	RT28	22,68
4	RT35	14,79	RT28	25,36	RT28	26,09
5	RT42	13,80	RT28	23,16	RT28	23,68
6	RT44	5,03	RT35	22,96	RT28	26,25
7	RT42	0,81	RT42	15,58	RT28	19,82
8	RT 42 ve RT44	3,11	RT42	19,22	RT28	24,35
9	RT44	13,23	RT31	28,25	RT28	30,24
10	RT35	18,65	RT28	26,49	RT28	27,32
11	RT28	22,14	RT28	23,04	RT28	24,37
12	RT44 dışındaki FDM'ler	1,62	RT44 dışındaki FDM'ler	3,79	RT44 dışındaki FDM'ler	7,16

4.4 Doğal Taşınımın PV/FDM Sistemi Analizleri

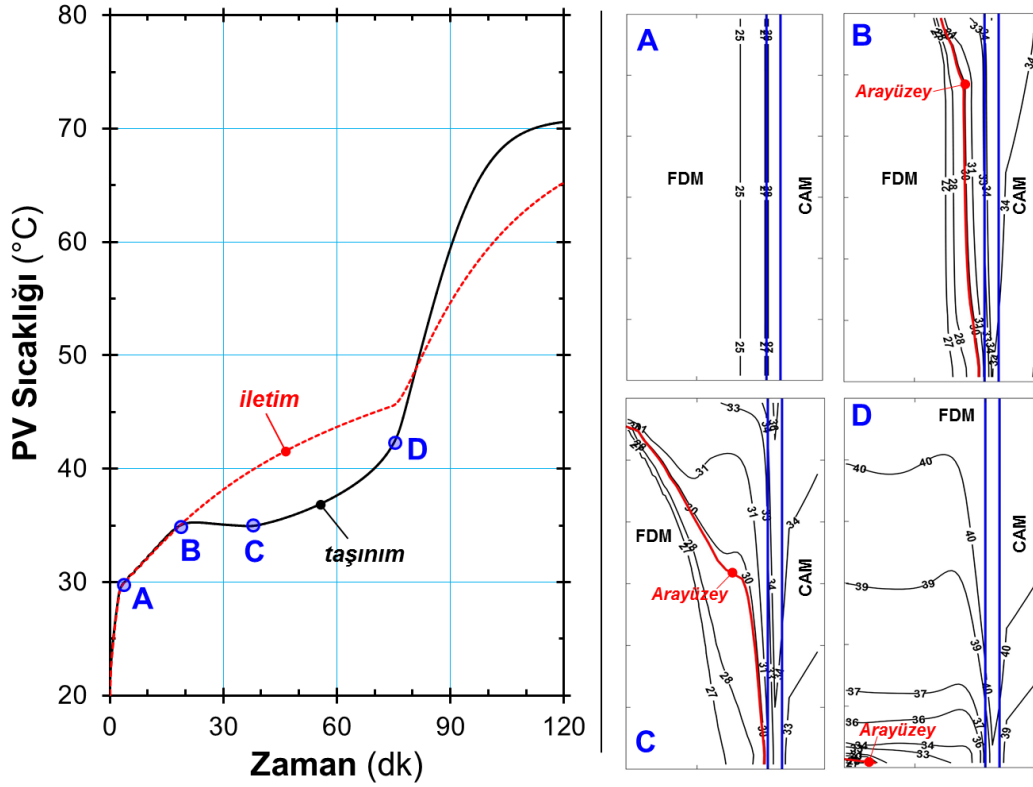
Parametrik doğrulama analizleri neticesinde proje kapsamında geliştirilen doğal taşınımın faz değişim modeli sonuçlarının literatürdeki deneysel ve sayısal dağılımlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Doğrulama analizlerinden sonra farklı çalışma ve tasarım parametreleri için karşılaştırmalı sonuçlar elde edilerek iletim ve taşınım etkili modeller arasındaki fark yorumlanmıştır.

4.4.1 Sabit Güneş Işınımı Analizleri

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde yaygın bir kabul olarak PV/FDM sistemlerinde FDM haznesi içerisindeki doğal taşınım etkisinin ihmal edildiği görülmektedir. Ancak FDM hazne geometrisine ve oluşacak sıcaklık farkına bağlı olarak sıvı FDM içerisindeki doğal taşınım hareketliliği ısı transfer hızını ve katı/sıvı ara-yüzey ilerlemesini etkileyebilir. Doğal taşınımın ve iletimin baskın olduğu ısı transferi mekanizmaları arasındaki farkı yorumlamak ve hangi durumlar altında doğal taşınım etkilerinin oluştuğunu gözlemlemek adına ilk etapta sabit güneş ışınımı etkisi altındaki PV/FDM sisteminin zamana bağlı sıcaklık değişimleri incelenmiştir.

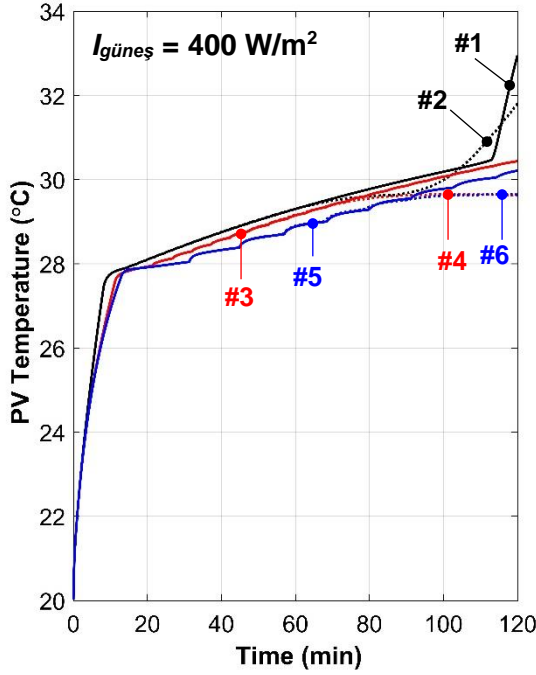
Şekil 4.13'de iletim ve taşınım etkin modeller arasındaki fark sunulmaktadır. Kırmızı kesikli çizgi doğal taşınım etkilerinin ihmal edildiği çözümü temsil etmektedir. Siyah düz çizgi ise doğal taşınımın ergime prosesine ait sonucu göstermektedir. İletim etkin model ile taşınım etkilerinin göz önüne alındığı çözümleme için elde edilen sonuçlar başlangıç zamanlarında benzer değişimler göstermektedir. $t = 0$ ile **A** noktası arasındaki duyulur ısınma periyodunda her iki

model sonucu üst üste çıkmıştır. **A** noktasında FDM ergimeye başladığından sıcaklığın zamana bağlı değişiminde kırılma gözlenmiştir. Sadece ısı iletim etkilerinin göz önüne alındığı modelde PV sıcaklığı doğrusala yakın bir eğilimle yükselmekte ve **D** noktası civarında gözlenen eğim kırılmasından FDM'nin tamamen sıvı faza geçtiği anlaşılmaktadır. Bu noktadan sonra PV sıcaklığı hızla yükselmektedir. Doğal taşınım etkilerinin dahil edildiği çözümlerde ise **A**, **B**, **C** ve **D** noktalarına ait sıcaklık dağılımları şeklin yanında verilmiştir. Buna göre **A** noktasındaki eş sıcaklık eğrilerinin yapısından doğal taşınım etkilerinin henüz oluşmadığı ve iletim etkin bir ısı geçişi mekanizması olduğu görülmektedir. **B** noktasında iletim ve taşınım etkin ısı transferi çözümlenmeleri arasında bir ayrım başlamaktadır. **B** noktasıyla işaretlenen anda FDM içerisinde eş sıcaklık eğrilerinin düşey yönde bozulmaya başladığı görülmektedir. Bunun nedeni sıvı FDM içerisinde oluşmaya başlayan doğal taşınım yapısıdır. Doğal taşınım hareketi nedeniyle sıcak PV yüzeyi ile FDM'nin katı fazı arasındaki ısı geçişi hızlanmaktadır. Buna bağlı olarak, FDM içerisinde doğal taşınım hareketliliği artmakta ve böylece PV sıcaklığının ani artışı sönümlenmektedir. İletim etkili modelde **B** noktasından sonra sıcaklık artışı devam etmektedir. Taşınım etkilerinin göz önünde tutulduğu matematiksel modelde ise panel sıcaklığı **B** ile **C** noktaları arasında sabit kalmaktadır. **C** noktasına ait eş sıcaklık eğrileri incelendiğinde FDM'nin neredeyse yarısının sıvı faza geçtiği görülmektedir. FDM'nin sıvı fazı içerisinde oluşan sıcaklık gradyeni nedeniyle PV panel sıcaklığı da artışa geçmektedir. Bu noktadan itibaren, artan sıvı hacmi ve sıcaklık farkı nedeniyle, sıvı FDM içerisindeki doğal taşınım hareketliliğinde artış beklenmektedir. Doğal taşınım hareketi ısı transfer hızını arttıracığından taşınım etkili duruma ait sıcaklık değişimleri sadece iletimin modellendiği duruma göre daha hızlı bir şekilde sürekli rejim değerine ulaşmaktadır. Doğal taşınım etkili model için **B** ile **D** noktaları arasında iletim etkin modele göre PV sıcaklıkları daha düşüktür. Ancak FDM'nin tamamen sıvı faza geçmesiyle birlikte doğal taşınım etkin model sıcaklığı aniden artmıştır.

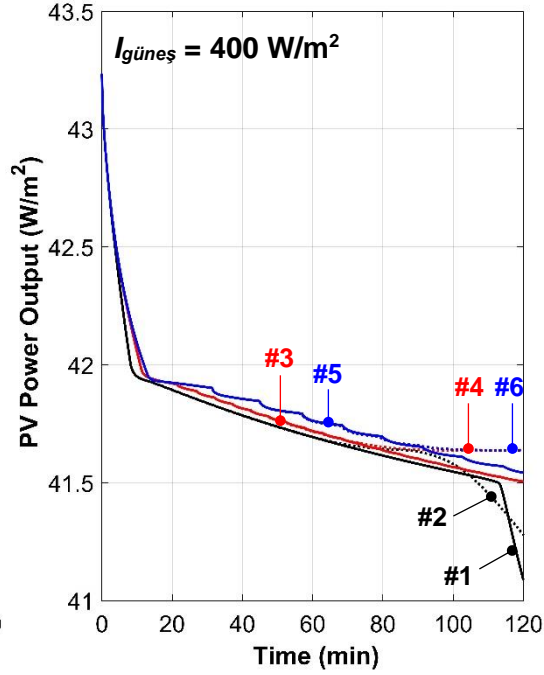


Şekil 4.13. İletim ve taşınım etkili faz değişiminin karşılaştırılması

Şekil 4.14'te 400 W/m^2 ışınım yükü altında ve üç farklı FDM kalınlığına sahip PV/FDM panellerinin iletim ve taşınım etkin model sonuçlarını sunmaktadır. Tüm durumlar için zamana bağlı sıcaklık değişimleri benzer davranış göstermiştir. FDM'nin ergime sıcaklığına ($T_m = 28^\circ\text{C}$) doğru doğrusal olarak artan sıcaklık bu noktada eğim değiştirmektedir. FDM kalınlığının artırılması eğrileri az da olsa aşağıya doğru ötelemiştir. Bu yük için sonuçlar 100. dakikaya kadar benzer davranış göstermiştir. $0,5 \text{ cm}$ kalınlığına sahip FDM tasarımının düşük ısıl ataletle sahip olması nedeniyle iletim ve taşınım etkin durumların her ikisinde de $t = 100 \text{ dk}$ 'dan sonra sıcaklık aniden yükselmiştir. Sıcaklık-zaman grafiğindeki değişimlerine benzer bir yapı güç üretimi ve verim grafiklerinde de oluşmuştur. Buna göre, ışınım şiddetinin düşük olması nedeniyle proses boyunca panel verimi %12,6 ila %12 arasında değişmektedir.



(a) PV Sıcaklığı



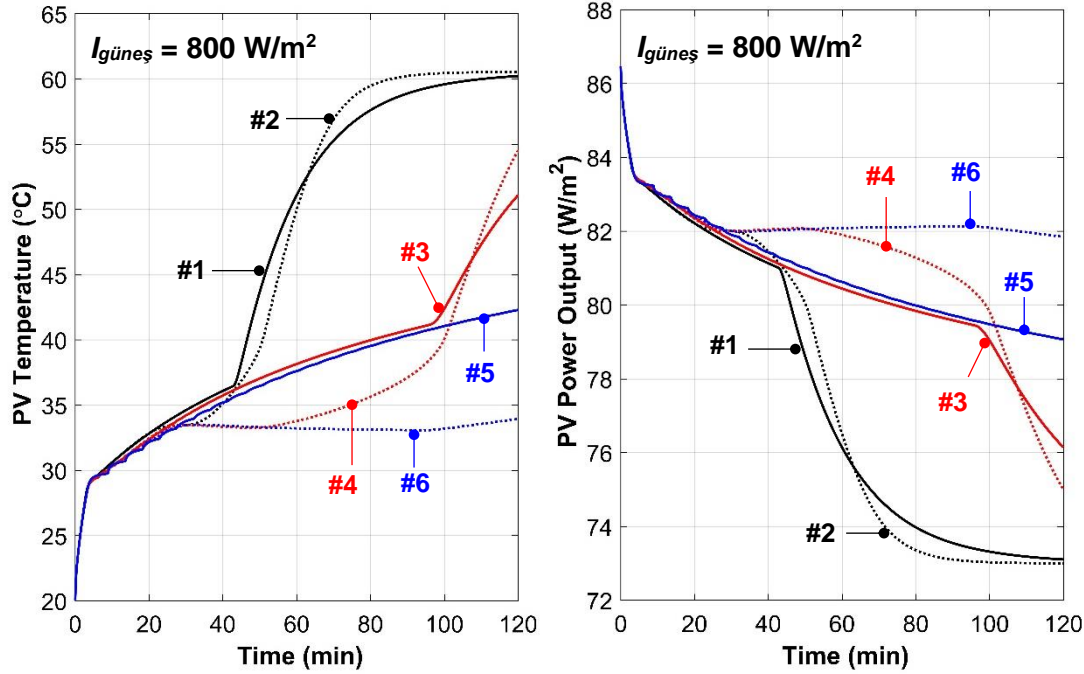
(b) Güç Üretimi

(#1: 0.5 cm iletim, #2: 0.5 cm taşınım, #3: 1.0 cm iletim, #4: 1.0 cm taşınım, #5: 2.0 cm iletim, #6: 2.0 cm taşınım)

Şekil 4.14. Sabit 400 W/m² güneş ışınımı altında PV/FDM sistemine ait PV sıcaklık değişimi ve güç üretimi

Şekil 4.15'te $I_{güneş} = 800 \text{ W/m}^2$ güneş ışınımı altında PV sıcaklığı ve güç üretiminin zamana bağlı değişimi verilmektedir. Güneş ışınım şiddetinin iki katına çıkmasıyla ergimenin daha erken başladığı görülmektedir. $t = 30$ dk'dan sonra FDM kalınlığına ve ısı transfer mekanizmasına bağlı olarak önemli değişiklikler gözlenmektedir. 0,5 cm FDM kullanılan durum için PV sıcaklığı hızla yükselerek 120 dk sonunda kararlı duruma ulaşmıştır. Ancak iletim etkin çözümlerle taşınım etkin çözüm arasında az da olsa fark olduğu görülmektedir. İletim etkin çözümlerde PV panel ve FDM arasındaki ısıl direnç nedeniyle $t = 40$ dk sonunda ısı aktarımı yavaşlamaktadır. Taşınım etkin çözümlerde ise ısı transferinin iyileştirilmesi nedeniyle FDM'nin daha çabuk sıvı faza geçtiği görülmektedir. Daha kalın FDM kullanıldığı durumlarda ise iletim etkin çözümlerle taşınım etkin çözümler arasındaki fark daha belirgindir. 1 cm FDM kullanılması durumunda, PV sıcaklığı $t = 25$ dk – 55 dk zaman aralığında 34°C'de sabitlenmiştir. 55 dk'dan sonra doğal taşınım hareketliliği ısı transferi hızını arttırmakta ve PV sıcaklığı 55°C'ye kadar artmaktadır. Öte yandan iletim etkin çözümlerde, PV sıcaklığı giderek artmaktadır ve $t = 95$ dk'da 41°C'ye ulaşmaktadır. 2 cm FDM kullanılması durumunda ise iletim etkin ve taşınım etkin çözümler sonucundaki PV sıcaklığı değişimlerinin tamamen farklı olduğu görülmektedir. İletim etkin çözümlerde sıcaklık sabit bir eğimle artarak 120 dk sonunda 42,5°C'ye ulaşmaktadır. Bu andaki güç üretimi de yaklaşık 79 W/m²'dir. Ancak

taşınım etkin çözümlenmede, ergime başladığı andan itibaren PV sıcaklığının neredeyse değişmeden kaldığı görülmektedir. 2 cm FDM kullanımı durumu için iki çözümlenme arasındaki güç üretimi ve PV sıcaklıkları arasındaki maksimum farklar sırasıyla %3,8 ve %25'tir.



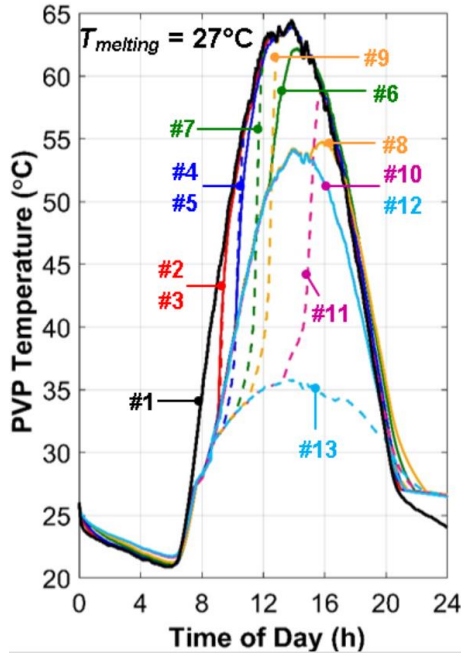
(#1: 0.5 cm iletim, #2: 0.5 cm taşınım, #3: 1.0 cm iletim, #4: 1.0 cm taşınım, #5: 2.0 cm iletim, #6: 2.0 cm taşınım)

Şekil 4.15. Sabit 800 W/m² güneş ışınımı altında PV/FDM sistemine ait PV sıcaklık değişimi ve güç üretimi

4.4.2 Zamana Bağlı Analizler

Değişken güneş ışınımı koşulları altında PV/FDM sisteminin ısıl davranışını incelemek için İzmir ili Temmuz ayı iklim koşullarında zamana bağlı analizler yapılmıştır. Şekil 4.16'da farklı kalınlıklarda FDM kullanılan PV/FDM sistemlerine ait zamana bağlı sıcaklık değişimi sunulmaktadır. Burada aynı zamanda iletim ve taşınım etkili modeller arasındaki fark da karşılaştırılmaktadır. Düz çizgiler FDM içerisindeki ısı transferinin sadece ısı iletimine gerçekleştiği kabulüne göre elde edilen sonuçları temsil etmektedir. Kesik çizgiler ise ısı iletiminin yanı sıra hesaplamalara ısı taşınımının da dahil edildiği durumu temsil etmektedir. Buna göre 27°C ergime sıcaklığına sahip FDM için, 0,5 cm ve 1 cm FDM kullanılan durumlarda iletim ve taşınım etkili modeller arasında belirgin bir fark görülmektedir. Artan FDM kalınlığı ile birlikte iletim ve taşınım yaklaşımları arasındaki fark artmaktadır. 2 cm FDM kalınlığı için ısı depolama kapasitesi düşük olduğundan saat 12:00 civarında FDM ergimekte ve sıcaklık hızla artarak referans PV sıcaklığına ulaşmaktadır. 2 cm FDM kalınlığı için iletim ve taşınım etkili modeller arasındaki fark saat 10:00 ila 14:00 arasında belirgindir. 2 cm için taşınım etkili modelin sıcaklığı iletim yaklaşımına kıyasla daha hızlı yükselmiştir. İletim çözümü bu kalınlık

için daha uzun süre PV sıcaklığının artışı sönümlenmiştir. Benzer durum 3 cm ve 6 cm kalınlığında kullanılan FDM kavileri için de geçerlidir. 3 cm, 6 cm ve 10 cm için iletim yaklaşımı kullanılarak yapılan analiz sonuçları 15:00'a kadar üst üstedir. Artan FDM kalınlığı taşınım etkili durumlarda FDM'nin tamamen ergimesi için geçen sürenin artmasına sebep olmaktadır ve bu nedenle iletim modeli ile taşınım modeli arasındaki fark artmaktadır. Örnek olarak 6 cm kalınlıktaki FDM uygulaması için taşınımlı modelde PV sıcaklığı saat 10:00 ile 15:00 arasında iletimli modelden düşüktür. İletim ve taşınım etkili çözümler arasındaki en büyük fark ise FDM kalınlığının 10 cm olarak alındığı durumda gözlenmiştir. Bu durum için iletimli çözümlerde sıcaklık değişimi referans duruma göre yaklaşık 10°C aşağıya ötelenmiştir. Ancak taşınım etkilerinin göz önüne alındığı durumda PV panel sıcaklığı maksimum 35°C civarına artmaktadır. Sonuç olarak referans panel sıcaklığına göre yaklaşık 30°C bir fark elde edilmektedir.

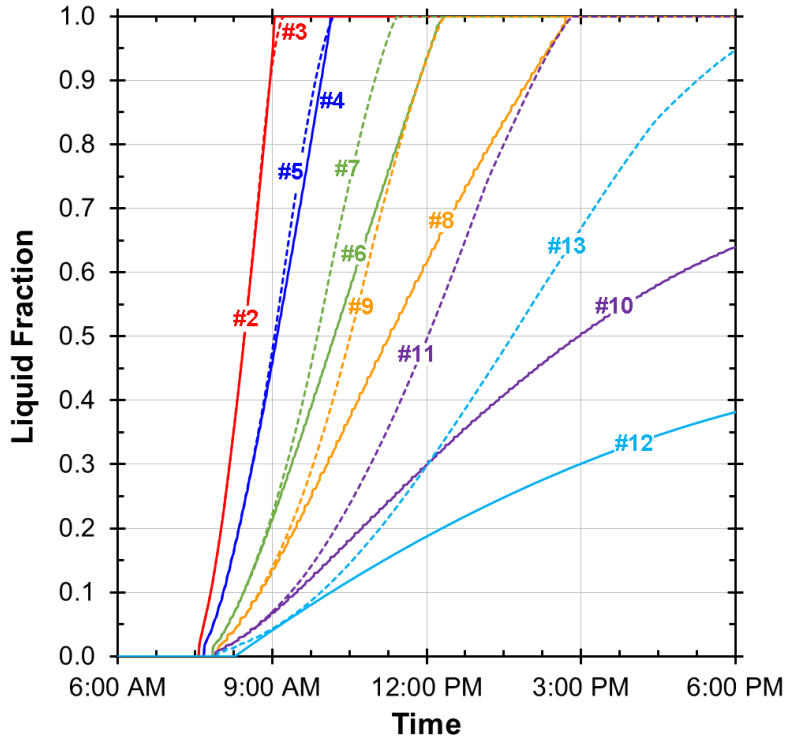


#1: PV panel, #2: 0,5 cm FDM iletim, #3: 0,5 cm FDM taşınım, #4: 1,0 cm FDM iletim, #5: 1,0 cm FDM taşınım, #6: 2,0 cm FDM iletim, #7: 2,0 cm FDM taşınım, #8: 3,0 cm FDM iletim, #9: 3,0 cm FDM taşınım, #10: 6,0 cm FDM iletim, #11: 6,0 cm FDM taşınım, #12: 10 cm FDM iletim, #13: 10 cm FDM taşınım

Şekil 4.16. Değişken güneş ışınımı koşulları altında (İzmir, Temmuz ayı) farklı kalınlıklarda FDM kullanılan PV/FDM sistemi için PV sıcaklığının zamana bağlı değişimi

Şekil 4.17'de iletim ve taşınım etkin çözümler için FDM'nin sıvı faz oranları arasındaki farklar verilmiştir. 0,5 cm FDM kalınlığı için, sıvı faz oranlarının proses boyunca neredeyse aynı olduğu görülmektedir. FDM kalınlığının artırılması, iletim ve taşınım etkin çözümler arasındaki farkı daha belirgin hale getirmektedir. 1 cm FDM kullanımı durumunda saat 9:00 – 10:30 arasında ara-yüzeyler arasında küçük bir fark görülmektedir. 2 ve 3 cm FDM kullanılması durumunda ise doğal taşınım hareketliliğinin ihmal edilmesi gerçekçi olmayan arayüzey

pozisyonları gözlenmesine neden olmuştur ve sıvı faz oranını tahmin etmede yetersiz kalmıştır. İletim etkin çözümlerde tamamen sıvı faza ulaşma süresinde yaşanan gecikmeler 2 cm ve 3 cm FDM kullanımı durumlarında sırasıyla yaklaşık 45 dakika ve 90 dakikadır. 6 cm FDM kullanımı durumunda, taşınım etkin çözümlerde saat 15:00 civarı FDM tamamen sıvı faza ulaşmıştır. İletim etkin çözümlerde ise sıvı faz oranı %50 civarındadır. Benzer şekilde $t_{FDM} = 10,0$ cm için iletim ve taşınım etkin çözümlerinin sıvı faz oranları arasındaki fark yaklaşık %135'tir. Buna göre 1 cm'den büyük FDM kalınlıkları için doğal taşınım hareketliliğinin ihmal edilmesinin yanıltıcı sonuçlara yol açtığı görülmektedir.



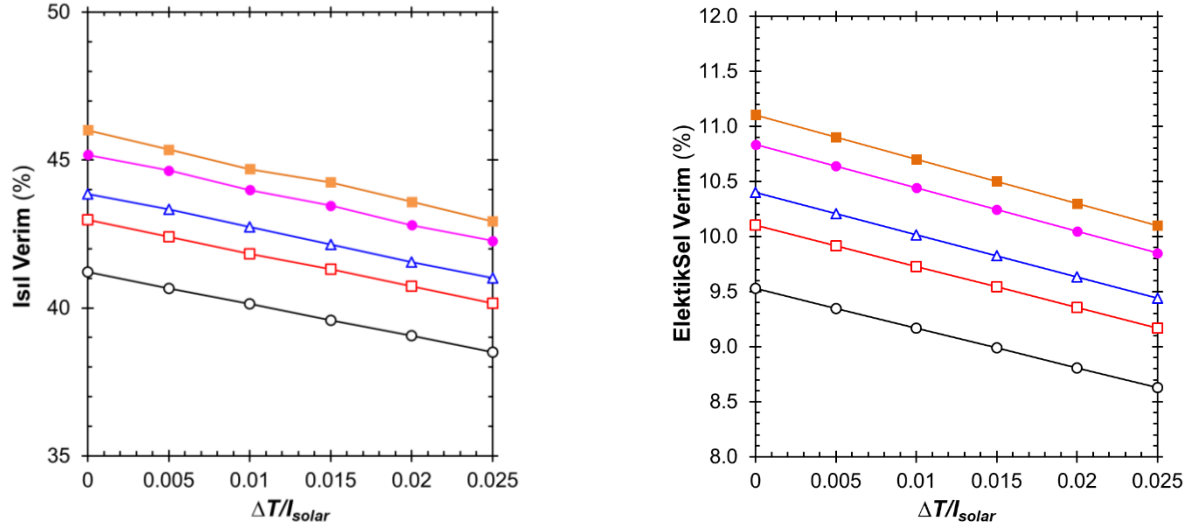
Şekil 4.17. FDM'nin sıvı faz oranının değişimi

4.5 PV/T ve PV/T/FDM Sistemlerinin Analizleri

4.5.1 Sürekli Rejim Analizleri

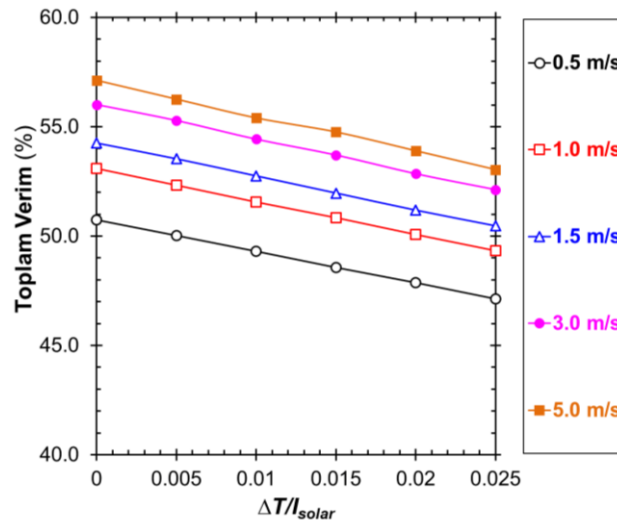
PV/T hibrit elektrik ve ısı üretimi sisteminin öncelikle sürekli rejim analizleri gerçekleştirilmiş ve uygulanan matematiksel çözüm yönteminin literatürle uyumu değerlendirilmiştir. Bu bağlamda farklı hava akış hızları ve $\Delta T/I_{solar}$ parametreleri için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. PV/T sisteminde PV yüzeyi ile cam arasındaki hava boşluğunda oluşan doğal taşınım hareketinin sonuçlar üzerine etkisini incelemek için ön analizler gerçekleştirilmiştir. Doğal taşınım etkilerini dahil etmek için etkin ısı iletim katsayısının tanımlanmasında iki farklı yaklaşım yapılmıştır. İlk yaklaşımda $k_{eff} = 2k_{hava}$ alınarak sabit bir ısı iletim katsayısı tanımlanmıştır. Bu yaklaşım için elde edilen sonuçlar Şekil 4.18'de verilmektedir. Artan akış hızı ve azalan $\Delta T/I_{solar}$ parametresi

için ısıl ve elektriksel verim artmaktadır. En yüksek ısıl verim %46, elektriksel verim ise %11,1 olarak tespit edilmiştir. Azalan akış hızı veya artan $\Delta T/I_{solar}$ parametresi için verim değerleri düşmektedir. En düşük ısıl ve elektriksel verim değerleri sırasıyla %39 ve %8,6 olarak tespit edilmiştir. PV/T sisteminin toplam verimi ise seçilen parametre aralığında %47 ile %57 arasında değişmektedir.



(a) Isıl Verim

(b) Elektriksel Verim

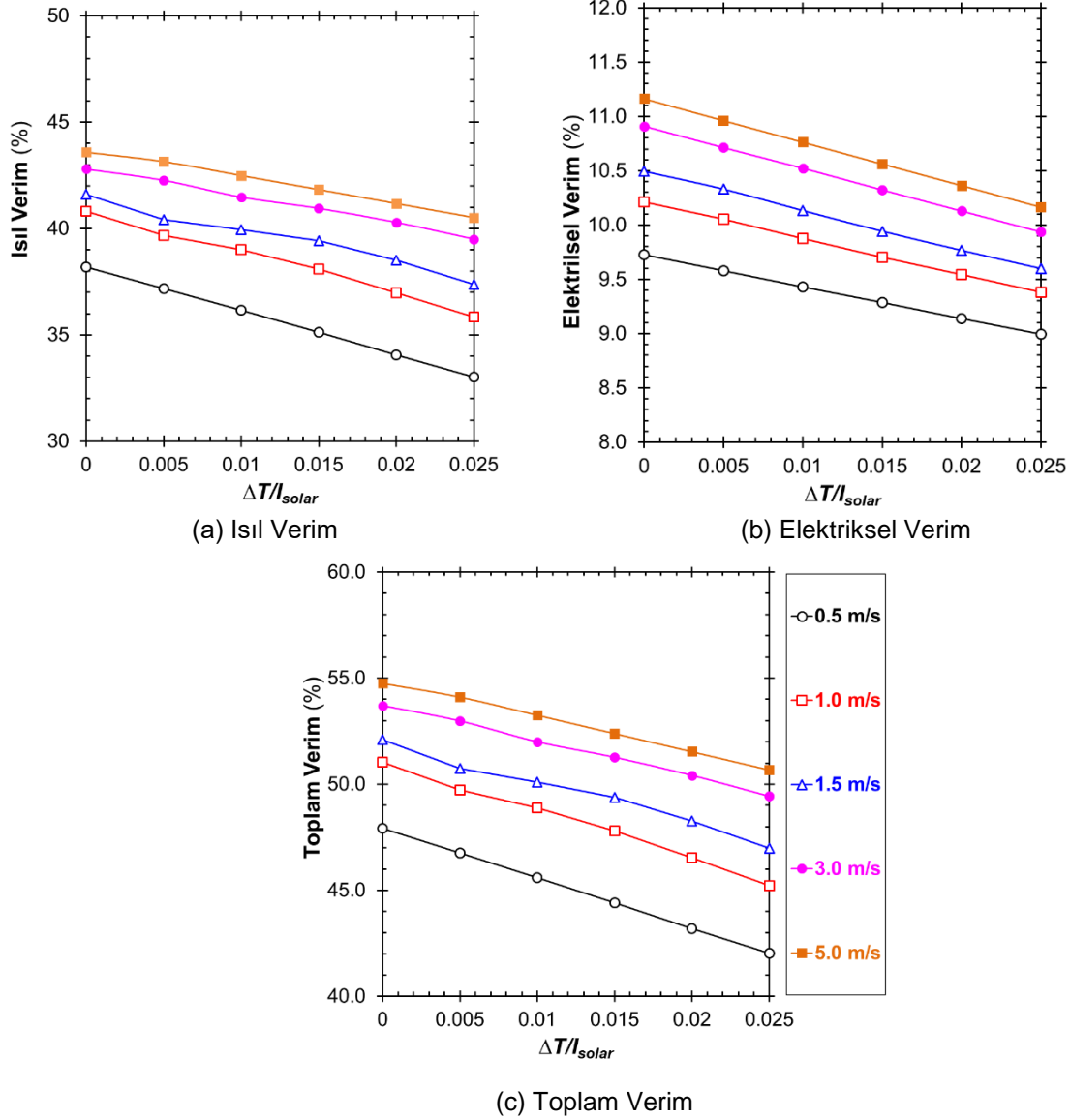


(c) Toplam Verim

Şekil 4.18. PV/T sistem veriminin akış hızına ve çalışma koşullarına bağlı değişimi – $k_{eff} = 2k_{hava}$

İkinci yaklaşımda ise k_{eff} değerinin tanımlanmasında Çengel & Ghajar (2014) tarafından önerilen Nusselt bağıntısı üzerinden ortalama hava sıcaklığına bağlı bir k_{eff} fonksiyonu kullanılmıştır. Bu yaklaşımda ısı iletim katsayısı artan sıcaklıkla birlikte artmakta ve 5 katına kadar çıkabilmektedir. k_{eff} fonksiyonunun ANSYS-FLUENT'e tanımlanması için kullanıcı-tanımlı-fonksiyon (UDF) hazırlanmıştır. Sıcaklığa bağlı k_{eff} fonksiyonunun kullanılması durumu için elde edilen verim değişimleri Şekil 4.19'da sunulmaktadır. Sabit k_{eff} tanımına kıyasla bu

durum için elde edilen ısı verimin nispeten düşük ancak elektriksel verimin ise yüksek olduğu görülmektedir. En yüksek ısı verim ve elektriksel verim değerleri sırasıyla %43,5 ve %11,2 civarındadır. Hava etkin ısı iletim katsayısının (k_{eff}) hava boşluğu ortalama sıcaklığı cinsinden tanımlanması durumunda artan ortalama sıcaklık ile sistemden ısı kaybı arttığından ısı verim önceki duruma göre azalmıştır. Artan ısı kaybı PV hücre sıcaklığını azalttığından elektriksel verim tersine artmıştır.



Şekil 4.19. PV/T sistem veriminin akış hızına ve çalışma koşullarına bağlı değişimi – k_{eff} bağıntısı

Sabit k_{eff} ve sıcaklığa bağlı k_{eff} tanımları için yapılan karşılaştırmalı yorumlar ışığında gerçekçi bir PV/T veya PV/T/FDM sistem modellemesi için sıcaklığa bağlı k_{eff} tanımının daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Zamana bağlı incelemelerde k_{eff} sıcaklığa bağlı tanımlanmıştır. PV/T ve PV/T/FDM sistemlerinin zamana bağlı ısı davranışları zaman ve sıcaklık kontrollü olmak üzere iki farklı yaklaşım için karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

4.5.2 Zamana Bağlı Analizler

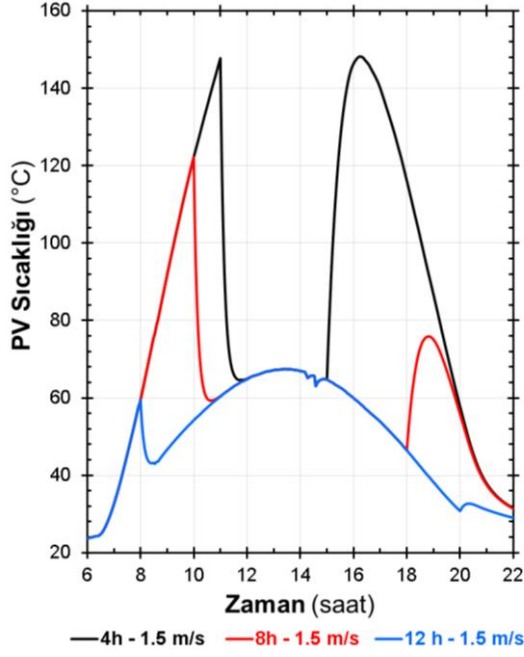
Zamana bağlı analizlerde iki tip akış kontrolcü için test edilmiştir: (i) Saat kontrollü ve (ii) Sıcaklık kontrollü. Analizler İzmir ili ve Temmuz ayına ait veriler için gerçekleştirilmiştir.

Saat Kontrollü Hava Akışı

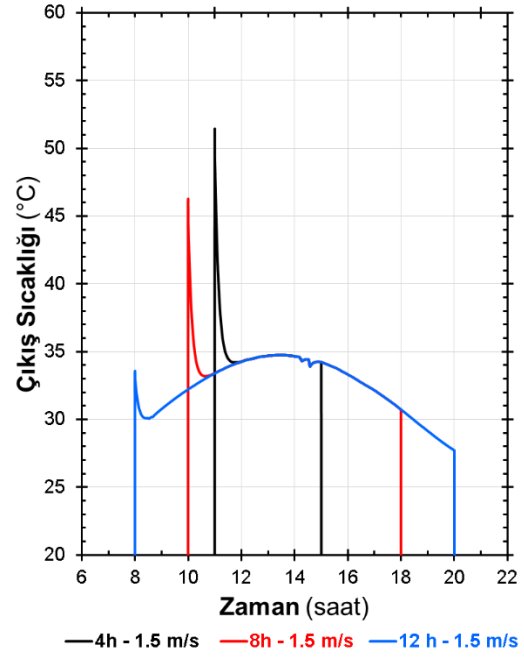
Öncelikle saat kontrollü sürekli akış durumu incelenmiştir. Buna göre hava akışı belli saat aralıklarında sürekli olarak aktif kalmaktadır. Proje kapsamında üç akış hızı için (1,5 m/s, 3 m/s ve 5 m/s) üç farklı saat kontrolü incelenmiştir. Buna göre hava akışının başlama ve bitiş saatleri şu şekilde belirlenmiştir: (i) 11:00 – 15:00, (ii) 10:00 – 18:00, ve (iii) 8:00 – 20:00.

Şekil 4.20, 4.21 ve 4.22 sırasıyla 1,5 m/s, 3,0 m/s ve 5,0 m/s akış hızları için elde edilen zamana bağlı PV sıcaklığı, çıkış sıcaklığı ve verim değişimleri sunulmaktadır. Şekil 4.20 incelendiğinde, hava akışının başlama ve bitiş saatinin PV sıcaklığına önemli etkisi olduğu görülmektedir. Hava akışının saat 11:00'da başlatıldığı durumda PV hücre sıcaklığı 144°C'ye kadar yükselmektedir. Bu PV için çok yüksek bir sıcaklık olup malzemede kalıcı hasarlar meydana gelebilir. Hava akışının başlatılmasıyla PV sıcaklığı aniden 60°C civarına inmektedir. Hava akışının kesildiği 15:00'dan itibaren PV sıcaklığı tekrar 140°C'nin üzerine yükselmektedir. Hava akışının saat 10:00 ile 18:00 arasında yapılması durumunda ise öğleden önceki en yüksek sıcaklık 120°C'dir. Akşam saatlerinde akışın kesilmesiyle PV sıcaklığı 78°C civarına yükselmiştir. Akışın saat 8:00 ile 20:00 arasında 12 saat boyunca devam etmesi durumunda ise en yüksek PV sıcaklığı 60°C olarak gözlenmiştir. Hava akış süresi PV sıcaklığı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Benzer şekilde PV güç üretim verimi de akış süresine bağlı olarak etkilenmektedir (Şekil 4.20(d)). Artan PV sıcaklığı ile düşen elektriksel verim, hava akışının başlamasıyla yükselmektedir. Ancak ısı verim veya çıkış sıcaklığı akış süresinden etkilenmemektedir. Akışkan hareketinin aktif olduğu süreler boyunca çıkış sıcaklıkları veya verim değerleri aktif kalma süresinden bağımsızdır.

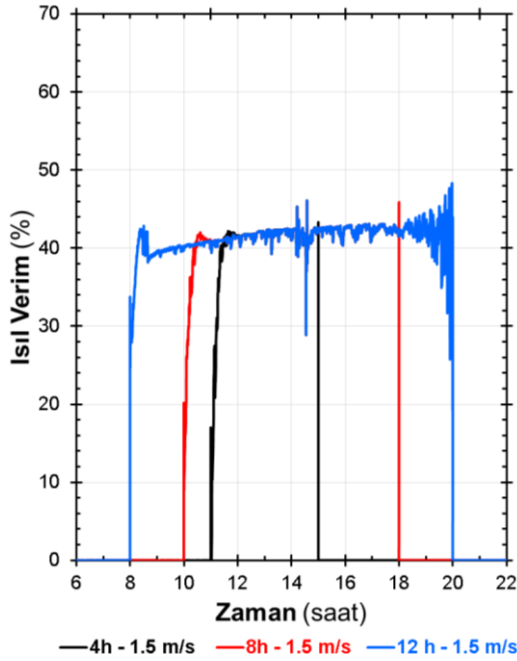
Şekil 4.21'de 3,0 m/s akış hızı için elde edilen zamana bağlı değişimler sunulmaktadır. Hava akışının aktif olduğu anlarda PV sıcaklığının 60°C'nin altına indiği gözlenmiştir. Artan akış hızı hibrit sistemin hem elektriksel hem de ısı verimini arttırmaktadır. En yüksek akış hızı olan 5,0 m/s için elde edilen zamana bağlı sonuçlar ise Şekil 4.22'de sunulmaktadır. Artan hava hızı PV sıcaklığının daha da düşmesini sağlamaktadır. Üç akış hızı için saat 13:00'da elde edilen elektriksel verimler şu şekildedir: %9,5, %10,25 ve %10,6.



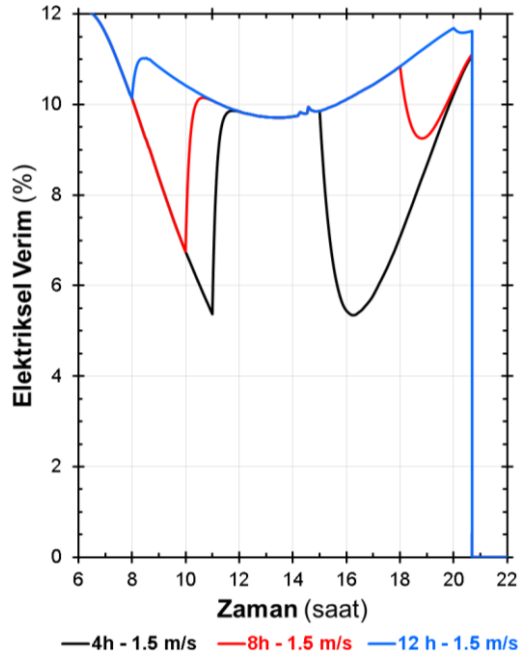
(a) PV Panel Sıcaklığı



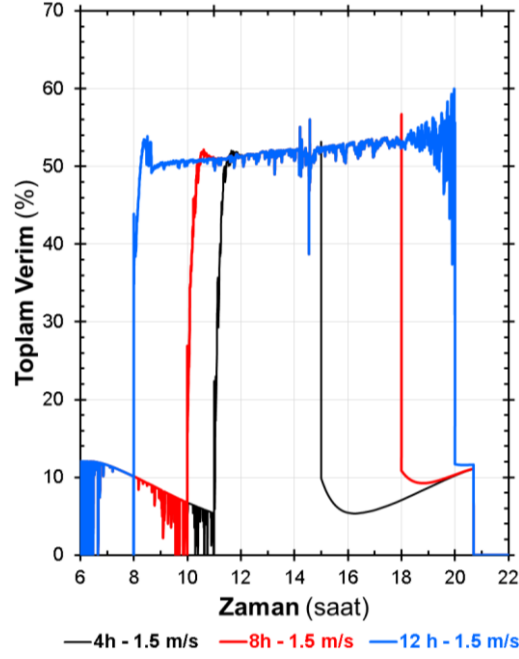
(b) Hava Çıkış Sıcaklığı



(c) Isıl Verim

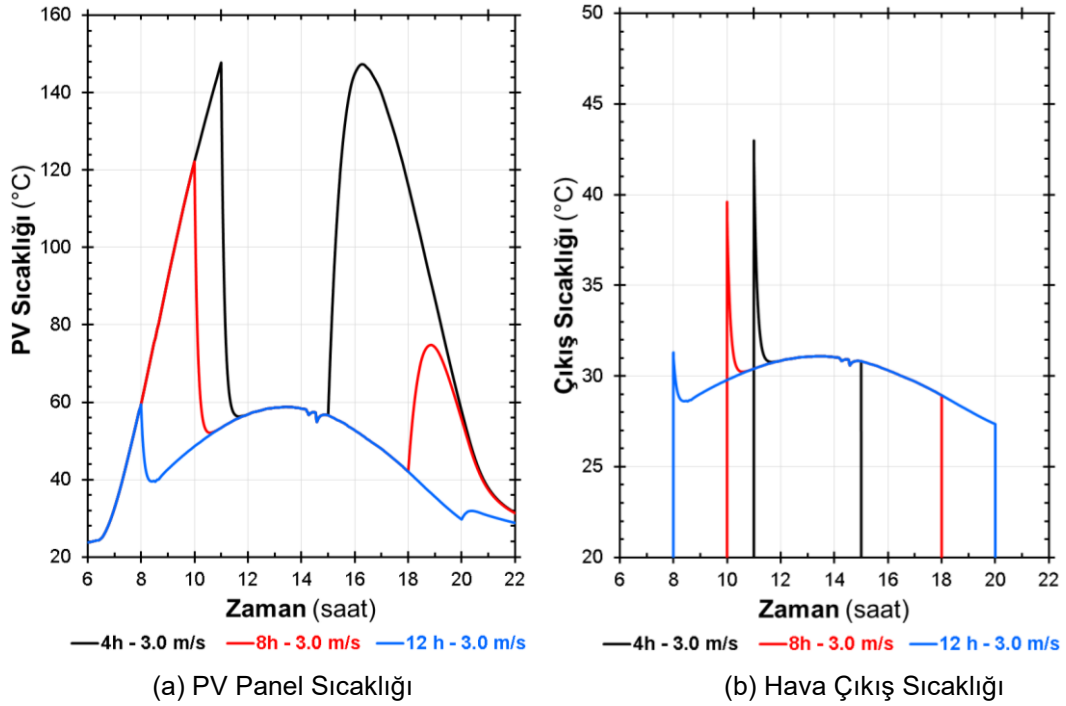


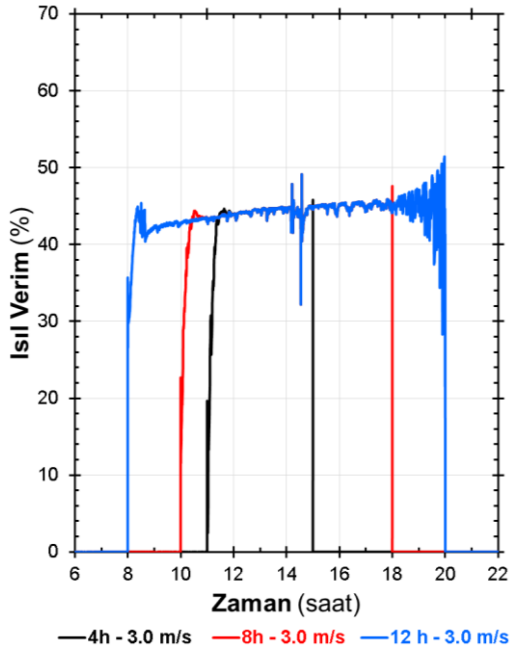
(d) Elektriksel Verim



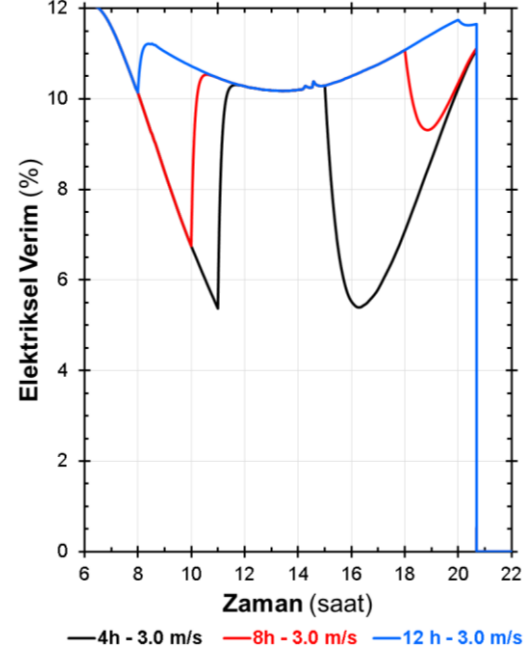
(e) Toplam Verim

Şekil 4.20. Hava akış süresinin PV/T sistem verimine ve çalışma sıcaklıklarına etkisi – $U_{hava} = 1,5 \text{ m/s}$

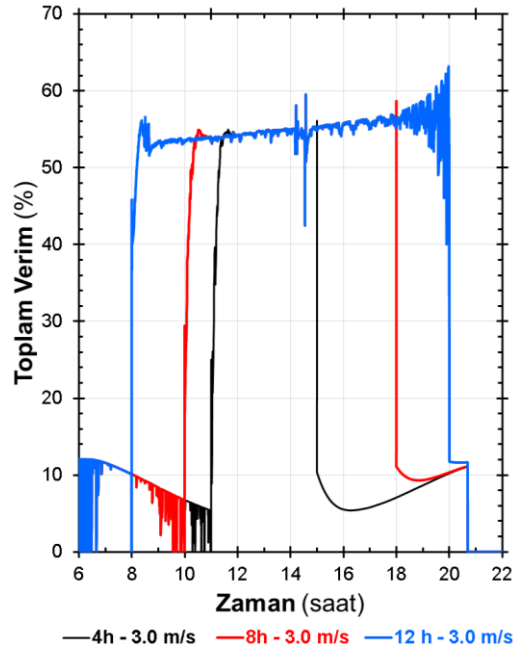




(c) Isıl Verim

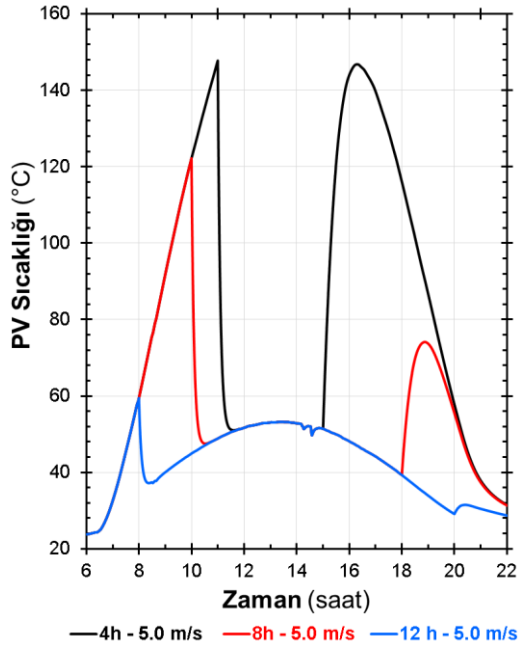


(d) Elektriksel Verim

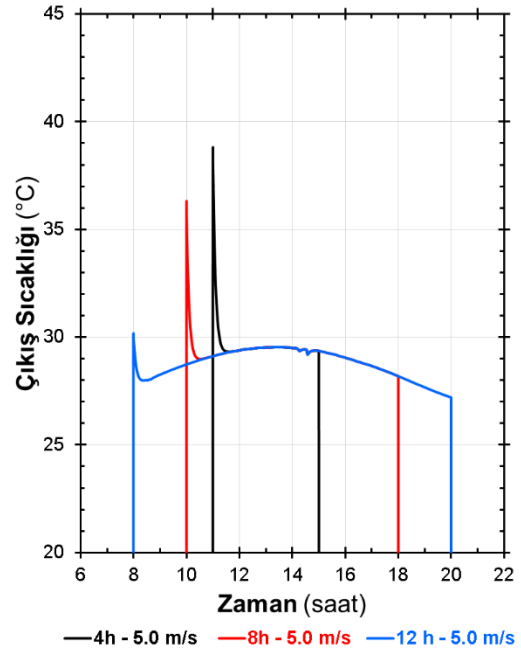


(e) Toplam Verim

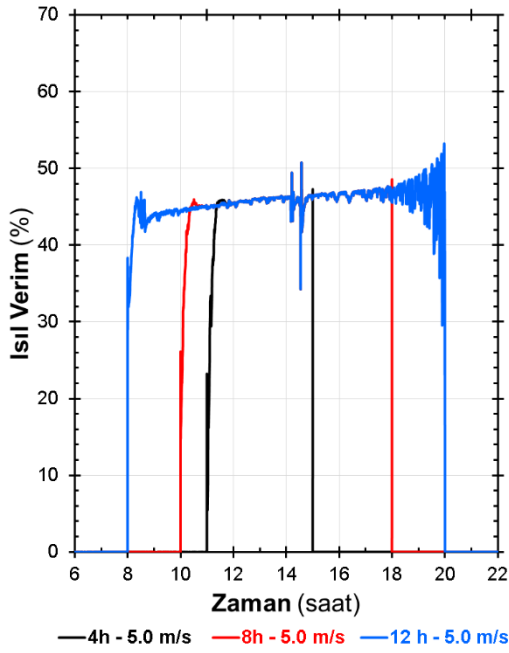
Şekil 4.21. Hava akış süresinin PV/T sistem verimine ve çalışma sıcaklıklarına etkisi – $U_{hava} = 3,0 \text{ m/s}$



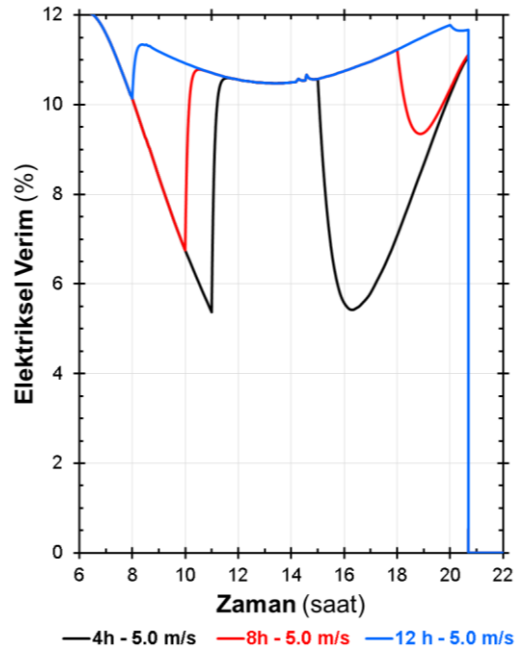
(a) PV Panel Sıcaklığı



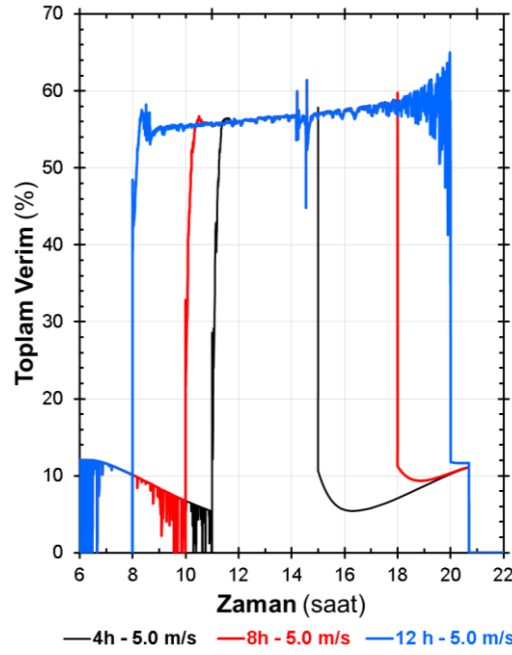
(b) Hava Çıkış Sıcaklığı



(c) Isıl Verim



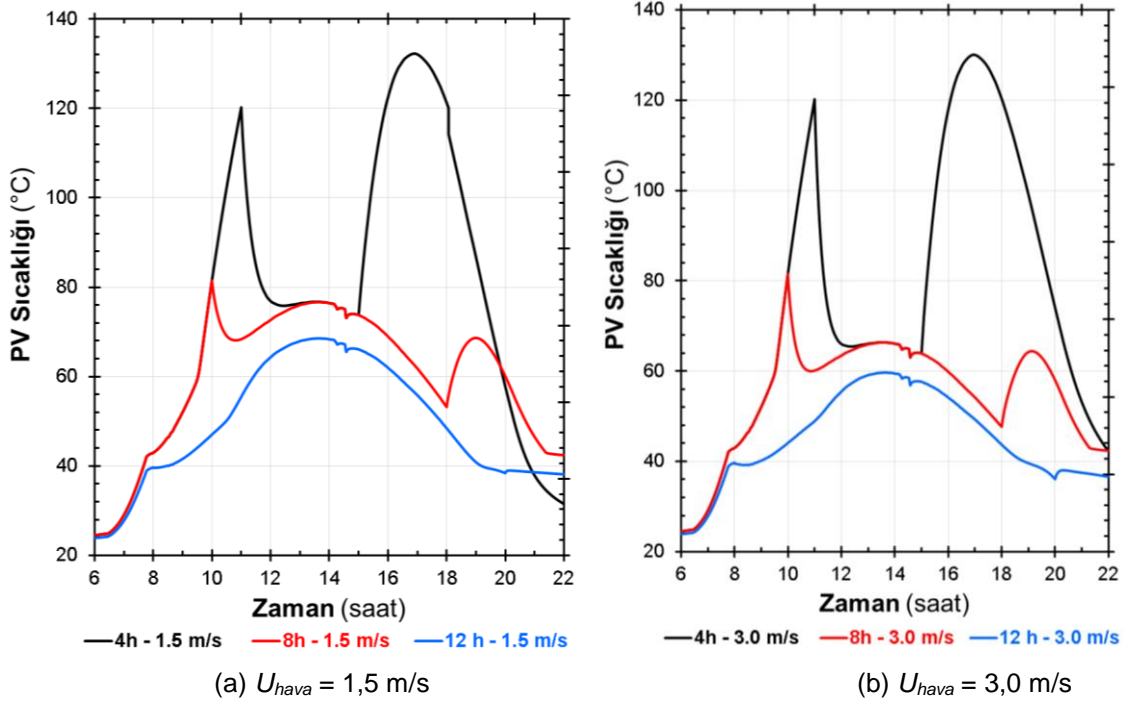
(d) Elektriksel Verim



(e) Toplam Verim

Şekil 4.22. Hava akış süresinin PV/T sistem verimine ve çalışma sıcaklıklarına etkisi – $U_{hava} = 5,0$ m/s

Şekil 4.23'te ise faz değişimi malzemesi içeren hibrit elektrik/ısı üretim sisteminin (PV/T/FDM) zamana bağlı sıcaklık değişimleri iki akış hızı ve üç farklı akış süresi için karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Sistemde ergime sıcaklığı 42°C olan FDM kullanılmıştır. Panel sıcaklığı güneş doğumunu takip eden ilk iki saat boyunca hızlı bir şekilde yükselmektedir. FDM kütlesinden dolayı sistemde oluşan yüksek ısıl sığa nedeniyle her iki akış hızı için de öğleden önceki saatlerde panel sıcaklığında gözlenen ani artışlar sınırlandırılmıştır. Şekil 4.21(a)'dan akış hızının $1,5$ m/s olduğu durum incelendiğinde, FDM içermeyen sistemde 4 saat, 8 saat ve 12 saatlik hava akışının olduğu durumlarda öğleden önceki en yüksek panel sıcaklık değerleri sırasıyla 144°C , 121°C ve 60°C 'dir. FDM içeren sistem için ise (Şekil 4.23(a)), öğleden önceki en yüksek panel sıcaklıkları 120°C , 81°C ve 68°C olarak gözlenmiştir. Hava akışının 4 saat ve 8 saat sağlandığı durumda FDM ilavesiyle panel sıcaklığı 20°C ila 40°C arasında düşürülmektedir. Ancak 12 saatlik hava akışının olduğu durumda FDM ilavesinin panel sıcaklığını arttığı görülmektedir. Hava hızının $3,0$ m/s olduğu durumda (Şekil 4.3(b)) taşınım ile hem FDM'den hem de panel yüzeyinden daha fazla ısıl enerji çekilebildiğinden panel sıcaklıkları daha düşük değerlere çekilebilmiştir. Entegre PV/T/FDM sisteminin uygun ısıl kontrolcüler altında aşırı ısınma etkisini ortadan kaldırılabileceği görülmektedir.



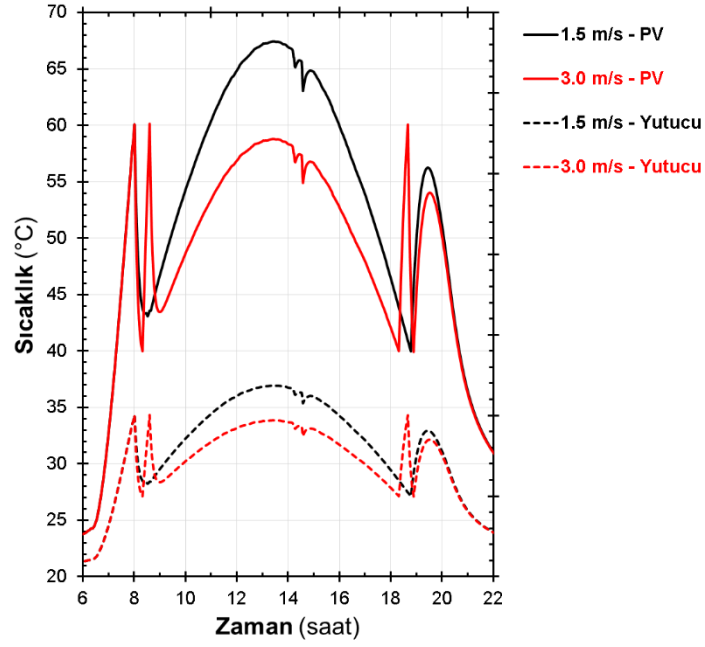
Şekil 4.23. PV/T/FDM sistemi için hava akış hızı ve akış süresinin çalışma sıcaklıklarına etkisi

Otomatik Kontrollü Hava Akışı

Belli zaman aralıkları boyunca hava akışının aktif olduğu PV/T veya PV/T/FDM sistemlerinde PV sıcaklığının aşırı yükseldiği görülmektedir. Etkin bir ısıtma ve aynı zamanda elektriksel güç eldesi için, PV yüzey sıcaklığının belirli bir aralıkta tutulmasını sağlayan bir akış kontrolcüsü kodu ANSYS-FLUENT ortamında hazırlanmıştır. İki farklı akış hızı gün PV ve yutucu yüzey sıcaklıklarının gün boyu değişimleri Şekil 4.24'te sunulmaktadır. Sistemde PV sıcaklığı 60°C değerine ulaştığında hava akışı başlamaktadır. Sıcaklık 40°C 'ye düştüğünde ise hava akışı kesilmektedir. Şekil 4.24(a) incelendiğinde, $1,5 \text{ m/s}$ hava hızı için saat 8:00 civarında PV sıcaklığının 60°C 'ye hızlı bir şekilde yükseldiği ve bu sıcaklığa ulaştıktan sonra aniden düştüğü görülmektedir. Hava akışının başlamasıyla PV sıcaklığı 43°C civarına düşmüştü ancak güneş ışınımından gelen ısı yükü, akışkan ile sistemden atılan ısı enerjiden fazla olduğundan sıcaklık tekrar yükselerek PV sıcaklığı 67°C 'ye kadar ulaşmıştır. Hava akışı açık olmasına rağmen yüksek güneş ışınımı nedeniyle PV sıcaklığı ancak 18:30 civarında 40°C 'ye düşebilmektedir. Bu anda hava hızı kesildiğinden sıcaklık yeniden 55°C civarına artmıştır. Etkisini kaybeden güneş ışınımı nedeniyle PV panel sıcaklığı yeniden düşüşe geçmektedir.

$3,0 \text{ m/s}$ hava akışı uygulanan durumda ise panel sıcaklığının 60°C 'ye ulaştığı 8:00 civarında hava tarafından sistemden uzaklaştırılan yüksek miktardaki ısı enerjisi nedeniyle panel sıcaklığının 40°C 'ye kadar soğutulabildiği görülmektedir. Bu anda kesilen hava akışı nedeniyle

PV sıcaklığı yeniden hızla artmış ve 60°C'ye ulaşmıştır. Bu andan sonraki davranış 1,5 m/s akış hızında elde edilen değişimlere benzerdir. Ancak 3,0 m/s akış hızında sistemden uzaklaştırılan ısı miktarı daha fazla olduğundan panelin en yüksek sıcaklığı 58°C civarındadır.



Şekil 4.24. PV/T sistem için akış kontrolcü sistemi sonuçları

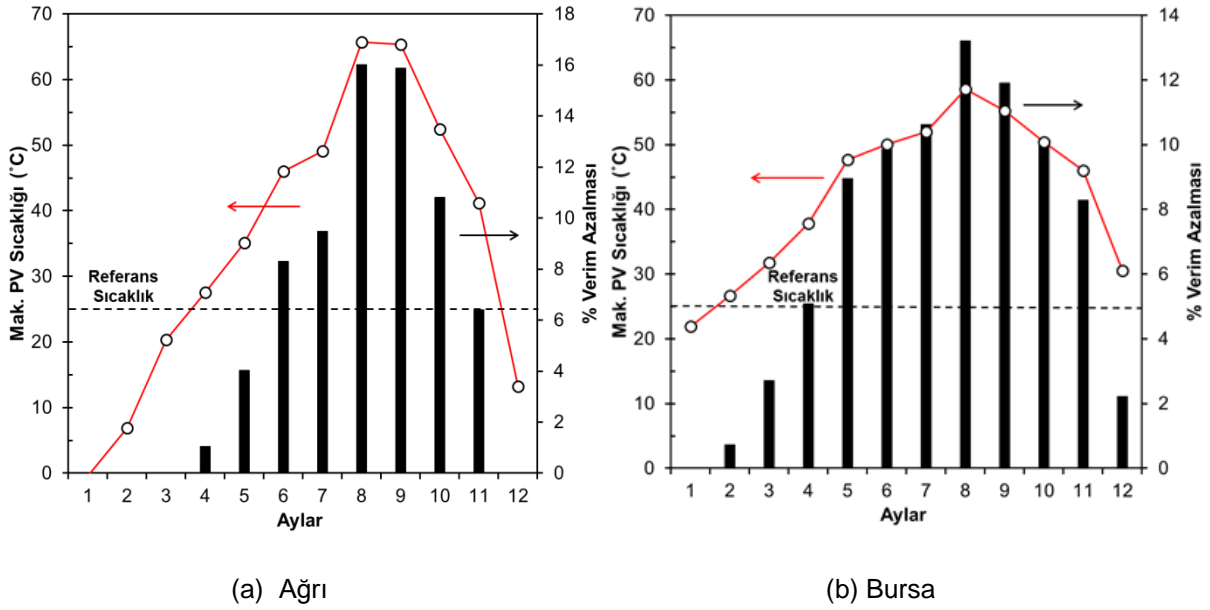
4.6 İller Bazında PV/FDM Sisteminin Analizleri

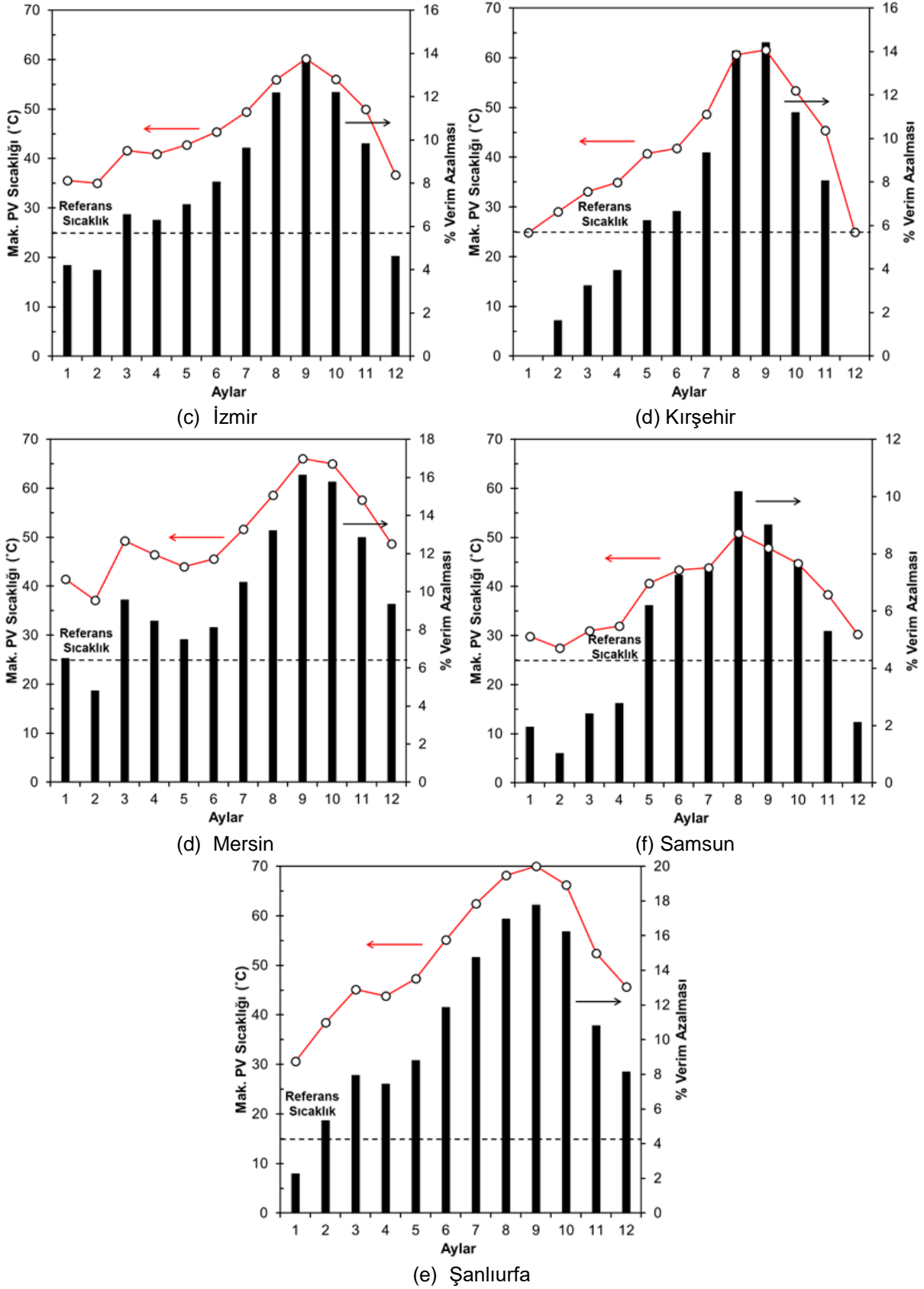
4.6.1 Referans PV Analizleri

Seçilen iller için PV panelin ısıl analizleri yapılmış ve yıllık maksimum PV sıcaklıkları belirlenmiştir. Bu sıcaklık artışına karşılık gelen verim düşüşleri sunularak ısıl kontrolcü kullanımının gerekliliği tartışılmıştır.

Şekil 4.26(a)'da Ağrı ili için yıllık maksimum PV sıcaklığı değerleri ve elektrik üretim verimliliğindeki azalma değerleri verilmektedir. Ocak, Şubat, Mart ve Aralık aylarında maksimum PV sıcaklığı referans sıcaklık değerinin (25°C) altında olduğu için verimde azalma görülmemektedir. Buna karşılık PV sıcaklığının Ağustos ve Eylül aylarında yılın en sıcak değeri olan 60°C 'ye artışı sebebiyle maksimum verim düşüşleri bu aylarda görülmüştür. Verim her iki ay içinde yaklaşık %16 civarında azalmıştır.

Bursa ili için maksimum PV sıcaklığı ve verim düşüşü değerleri Şekil 4.26(b)'de verilmektedir. Ocak ayında maksimum PV sıcaklığı referans değerin altında olduğu için verimde azalma görülmemiştir. Yıllık maksimum verim düşüşü ise %13 civarındadır ve yılın en sıcak ayı olan Ağustos ayında gözlenmiştir. Mayıs ve Ekim ayları arasında sıcaklık dalgalanmalarının çok fazla olmaması sebebiyle maksimum verim düşüşleri %10-13 arasında değişmektedir.





Şekil 4.26. Farklı iklim bölgeleri için maksimum PV sıcaklığı ve verimdeki maksimum azalma değerleri (a) Ağrı, (b) Bursa, (c) İzmir, (d) Kırşehir, (e) Mersin, (f) Samsun, (g) Şanlıurfa

Şekil 4.26(c)'de ise İzmir ili için maksimum sıcaklık ve verim azalması değerleri sunulmuştur. İzmir ili sıcak iklim bölgesinde yer almaktadır. Bu nedenle yıl boyunca PV sıcaklığı referans değerinin üzerinde seyretmektedir. Yılın her döneminde verim kaybı yaşanmaktadır. Bu il için maksimum verim düşüşü Eylül ayında %14 seviyesindedir. Maksimum PV sıcaklıkları diğer illerde olduğu gibi en yüksek güneş ışınımı değerleri alınan sonbahar aylarında gözlenmiştir. Verimdeki azalma seviyesi ise yıl boyunca %4-14 arasında değişmektedir.

Şekil 4.26(d)'de Kırşehir ili için maksimum PV sıcaklığı ve verimdeki azalma değerleri verilmektedir. Ağustos ve Eylül aylarında %14'ü bulan verim düşüşleri gözlenmektedir. Yaz aylarında başlayan verim düşüşleri sonbahar mevsiminin sonuna kadar %8 değerinin üzerindedir. Ocak ve Aralık aylarında ise maksimum PV sıcaklığı referans sıcaklığın altında olduğu için verimde azalma yaşanmamaktadır.

Mersin ili için maksimum PV sıcaklığı ve verimdeki azalma değerleri Şekil 4.26(e)'de sunulmaktadır. Mersin ili sıcak iklim bölgesindedir ve yıl boyunca yüksek ışınım almaktadır. Bu nedenle PV sıcaklığının artmasından dolayı yaşanan verim düşüşleri yıl boyunca yüksektir. Özellikle Eylül ve Ekim aylarında PV sıcaklığının yıl boyunca en yüksek değerlere ulaşması nedeniyle %16 civarında verim kaybı yaşanmaktadır. Buna karşılık Mersin ili için kış aylarında bile verim kaybı ortalama %7 civarında seyretmektedir. Bu durum yüksek güneş ışınımı alan sıcak iklim bölgelerinde PV panel ısı kontrolcüsü kullanmanın gerekliliğini ortaya koymaktadır.

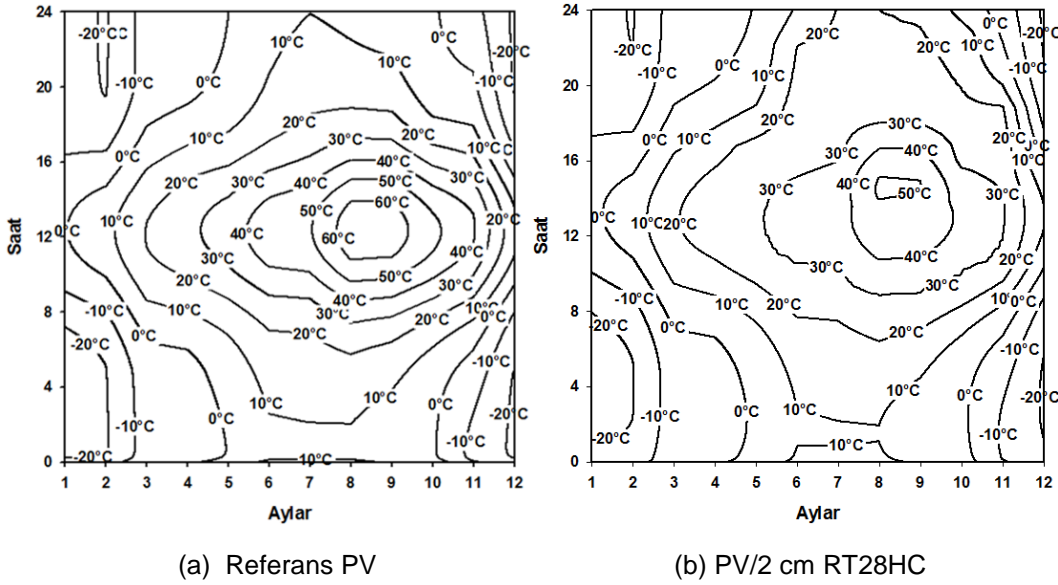
Şekil 4.26(f)'de Samsun ili için maksimum PV sıcaklığı ve verim düşüşü değerleri verilmiştir. Yıl boyunca en yüksek verim düşüşü Ağustos ayında gözlenmiş olup %10 seviyesindedir. Kış ve ilkbahar aylarında referans sıcaklığa yakın değerlerde seyreden PV sıcaklıkları nedeniyle verim düşüşleri %3'ün altındadır.

Şanlıurfa ili için maksimum PV sıcaklığı ve verim düşüşü değerleri Şekil 4.26(g)'de sunulmaktadır. İncelenen iller içerisinde en yüksek PV sıcaklıkları ve verim düşüşlerinin gözlendiği il Şanlıurfa'dır. Yıl boyu yüksek güneş ışınımı alması ve dış ortam sıcaklıklarının yüksek olması nedeniyle yıl boyunca maksimum PV sıcaklığı referans değerinin üzerindedir. En sıcak ay olan Eylül ayı için PV sıcaklığı referans sıcaklığın 45°C üzerine çıkmıştır. Bu sıcaklık artışı %18 seviyesinde verim düşüşüne sebep olmuştur. Haziran-Kasım ayları arasındaki periyotta %10'un üzerinde düşüş gözlenmiştir. İlkbahar aylarında ise verim düşüşü yaklaşık %5 civarındadır.

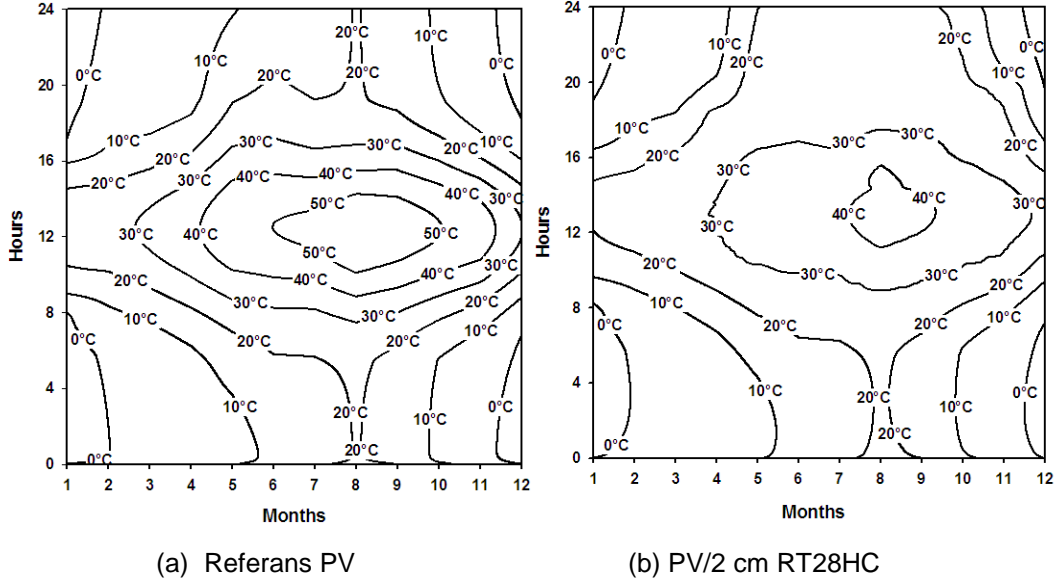
4.6.2 PV/FDM Sistemi

Bu bölümde PV/FDM sisteminin ısı performansı incelenmiştir. Seçilen iller için referans PV ve PV/FDM sisteminin yıllık PV sıcaklıkları karşılaştırmalı olarak verilerek sonuçlar yorumlanmıştır. Her il için, uygun FDM tipi ve kalınlığı tespit edilmeye çalışılmıştır.

Şekil 4.27’de Ağrı ili için referans PV sıcaklığının yıllık değerleri ve 2 cm kalınlığındaki RT28HC kullanılan PV/FDM sisteminin yıllık PV sıcaklığı değerleri verilmektedir. PV sıcaklığı Mayıs ayına kadar referans sıcaklığın altındadır. Mayıs ayında ise sadece öğleden sonra 12.00 – 16.00 zaman diliminde referans sıcaklığın 5°C üzerine çıkabilmektedir. Bu nedenle bu aylarda ısı kontrolcü kullanımına gerek yoktur. Yaz aylarında ise gün doğumundan itibaren PV sıcaklığı referans değerinin üzerine çıkmaktadır. Özellikle 10.00 – 14.00 aralığında maksimum değerlere ulaşmaktadır. Eylül ve Ekim aylarında da düşey yüzeye gelen güneş ışınımının yüksek olması nedeniyle PV sıcaklığı yaz aylarına benzer şekilde öğle saatlerinden sonra yükselmektedir. Kasım ve Aralık aylarında ise maksimum sıcaklık 20°C’nin altındadır. Bu nedenle ısı kontrolcüye gerek yoktur. Ağrı ili için optimum FDM tipi RT28HC, kalınlık ise 2 cm’dir. Şekil 4.27(b)’de PV/FDM sisteminin yıllık PV sıcaklığı değerleri verilmektedir. Mayıs ayına kadar izotermiler benzer şekilde gözlenmiştir. Yaz ve sonbahar aylarında ise PV’nin elektrik üretebildiği zaman dilimindeki sıcaklıklar, referans PV’ye göre yaklaşık 10°C aşağıya çekilmiştir.

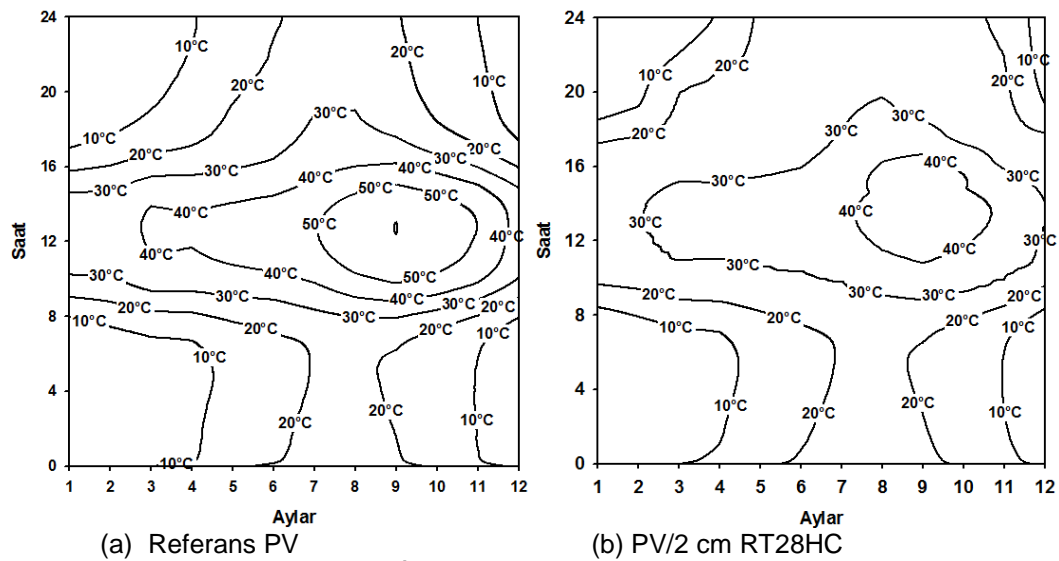


Şekil 4.27. Ağrı ili yıllık PV sıcaklığı değerleri



Şekil 4.28. Bursa ili yıllık PV sıcaklığı değerleri

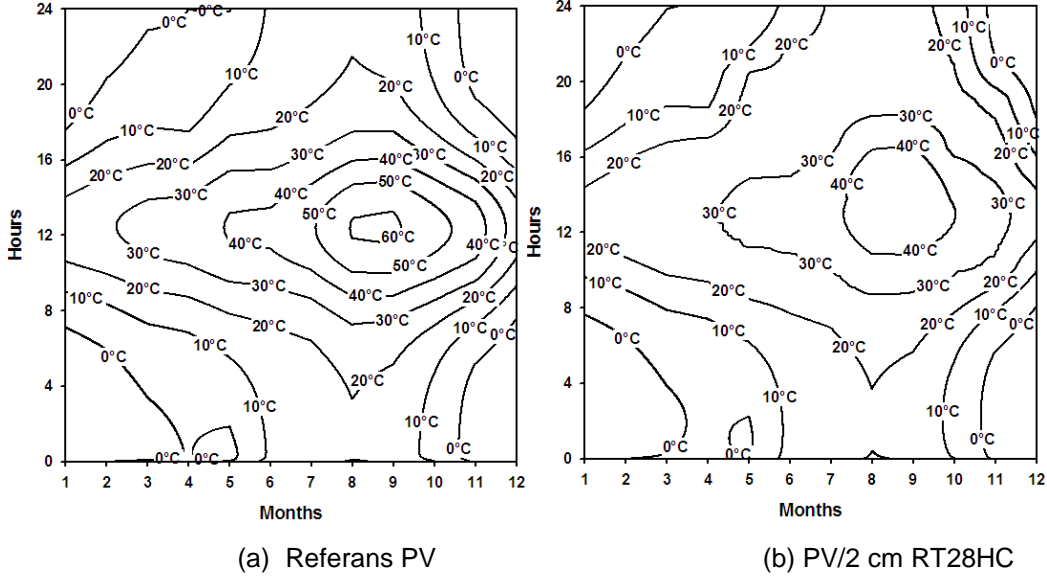
Bursa ili için yıllık PV sıcaklığı değerleri Şekil 4.28’de verilmektedir. Buna göre Ocak ve Şubat aylarında gün boyunca maksimum PV sıcaklığı referans değerinin altındadır. Mart ve Nisan aylarında da sadece öğle saatleri civarında maksimum PV sıcaklığı referans değerinin üstüne çıkmaktadır. Ancak Mayıs ayında PV’nin aktif olarak elektrik üretebildiği gündüz saatlerinde sıcaklık 40°C’ye kadar çıkabilmektedir. Haziran ayından Kasım ayına kadar olan süre boyunca, PV’nin aktif olarak elektrik üretebildiği zaman diliminde PV sıcaklığı referans sıcaklığın üzerindedir. Şekil 4.28(b)’de 2 cm RT28HC kullanılan PV/FDM sistemine ait yıllık maksimum PV sıcaklıkları verilmiştir. Ocak ve Şubat aylarında FDM etkisi gözlenmemekte ancak Mart ayında gün boyunca PV’nin referans sıcaklığının altında çalışması sağlanmıştır. Yılın en sıcak ayları olan Ağustos ve Eylül aylarında 10°C, Haziran ve Temmuz aylarında ise 20°C’ye varan sıcaklık düşümleri elde edilmiştir.



Şekil 4.29. İzmir ili yıllık PV sıcaklığı değerleri

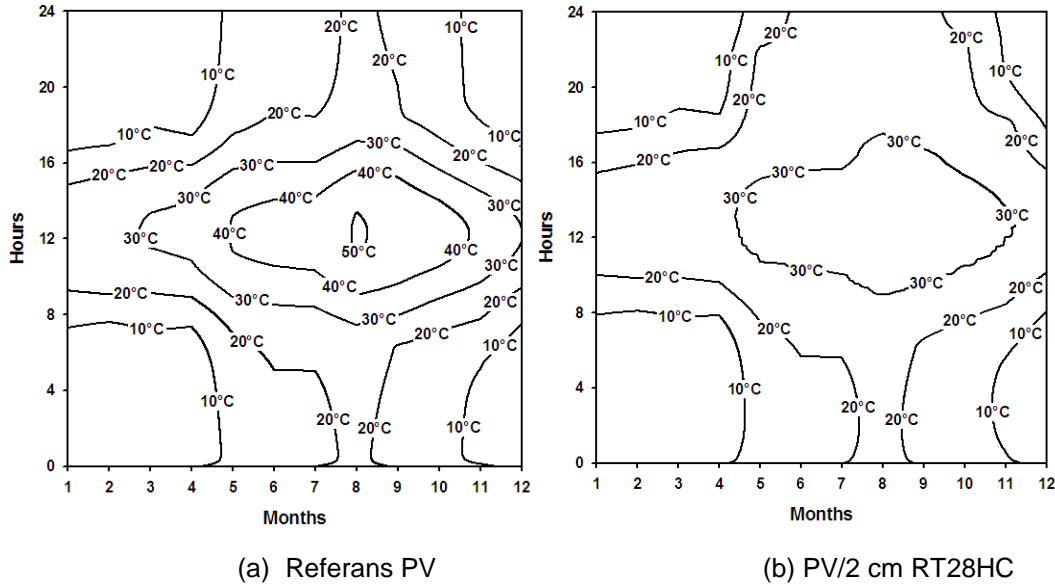
İzmir ili için yıllık PV sıcaklığı değerleri Şekil 4.29'da verilmektedir. Yıl boyunca gündüz saatlerinde PV sıcaklığının referans sıcaklığın üzerinde olduğu görülmektedir (Şekil 4.29(a)). Öğle 12.00 civarında tüm aylar için PV sıcaklığı maksimum değerindedir. Özellikle yaz ve sonbahar mevsimlerinde PV'nin elektrik ürettiği zaman diliminde referans sıcaklığın 25-30°C üzerinde çalışmaktadır. Şekil 4.29(b)'de ise 2 cm RT28HC uygulamasıyla tüm aylar için öğle saatlerinde PV sıcaklığının azaldığı görülmektedir. Ancak saat 16.00'dan sonra Nisan-Kasım ayları arasında referans PV'ye göre daha yüksek sıcaklıklar izlenmiştir. Bunun nedeni İzmir ilinin yıl boyu sıcak iklime sahip olması nedeniyle, PV/FDM sisteminde ise FDM uygulaması 10.00 – 16.00 saatleri arasında PV sıcaklığını referans PV'ye göre 10°C azaltmaktadır. Ancak saat 16.00'dan sonra izotermeler arasındaki açıklık artmakta ve referans PV'ye göre daha yüksek sıcaklıklar gözlenmektedir. Bunun nedeni güneş ışınım şiddetinin yüksek olduğu öğle saatlerinde eriyen FDM'nin ışınım şiddetinin azaldığı akşamüstü saatlerinde hemen soğuyamaması ve FDM'ye göre daha çabuk soğuyan PV yüzeyini ısıtmasıdır. Sabah 08.00'e kadar olan zaman diliminde ise, referans PV ve PV/FDM sisteminin ısı davranışı benzerlik göstermektedir.

Kırşehir ili için yıllık PV sıcaklığı değerleri Şekil 4.30'da verilmektedir. Kış aylarında PV'nin verimini önemli ölçüde etkileyen sıcaklık artışları görülmemektedir. Ancak Mayıs ayından Kasım ayına kadar olan süre boyunca gün doğumundan kısa bir süre sonra PV sıcaklığı referans değerinin üzerine çıkmaktadır. Bu zaman diliminde saat 16.00'a kadar PV referans sıcaklığın üzerinde çalışmaktadır. Bu durum gün boyunca verim kaybı yaşandığı anlamına gelmektedir. Özellikle Ağustos ve Eylül aylarında öğle saatlerinde PV sıcaklığı referans sıcaklığın 35°C üzerinde çalışmaktadır. 2 cm RT28HC uygulamasıyla bu aylarda maksimum PV sıcaklığının 20°C azaltıldığı Şekil 4.30(b)'de görülmektedir. Buna ek olarak PCM uygulaması Mayıs-Kasım arasındaki zaman diliminde 10°C sıcaklık düşüşü sağlamıştır. Ancak bu zaman diliminde, saat 16.00'dan sonra referans PV'ye göre daha yüksek sıcaklıklar görülmektedir. Bunun nedeni eriyen FDM'nin hemen soğuyamaması ve PV yüzeyini ısıtmasıdır. Ancak saat 16.00'dan sonra azalan güneş ışınımı şiddeti nedeniyle PV'nin elektrik üretimi önemli ölçüde azalmakta ve bu yüzden eriyen FDM'nin güç üretimi üzerine olumsuz bir etkisi olmamaktadır.



Şekil 4.30. Kırşehir ili yıllık PV sıcaklığı değerleri

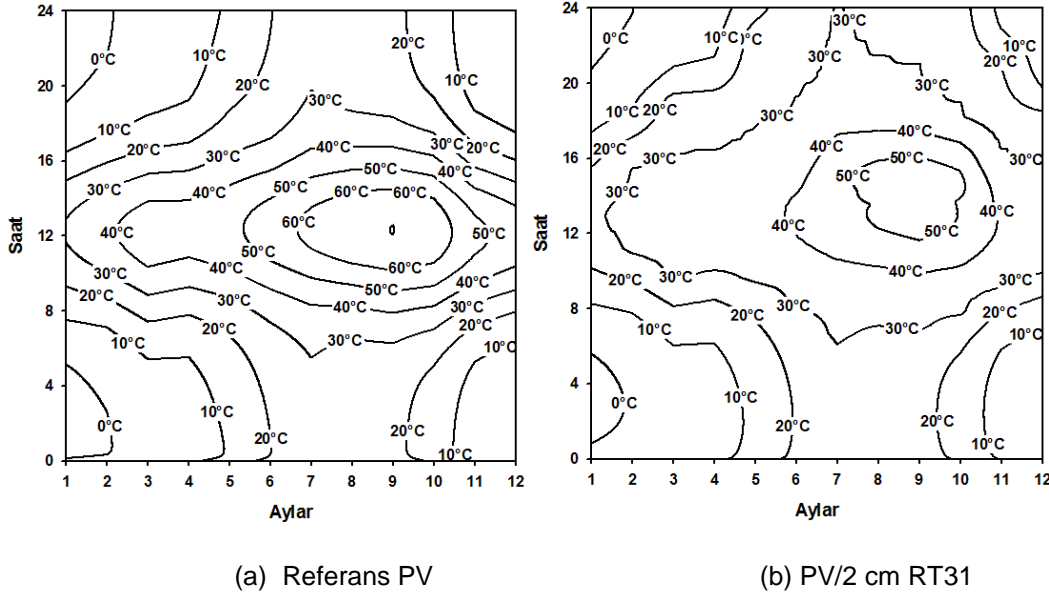
Samsun ili için referans PV'nin ve PV/FDM sisteminin yıllık PV sıcaklıkları Şekil 4.31'de verilmektedir. Bu il için referans PV maksimum sıcaklığa (50°C) ağustos ayında ulaşmaktadır. Ocak - Mayıs ayları arasında PV sıcaklığı referans değerinin üzerine sadece öğle saatlerinde çıkmaktadır. Ancak Mayıs ayından sonra gün doğumundan itibaren referans sıcaklıktan yüksek PV sıcaklıkları gözlemlenmektedir. 2 cm RT28HC uygulamasıyla Mayıs-Kasım ayları arasındaki zaman diliminde özellikle öğle saatlerinde 20°C'ye varan sıcaklık düşümü sağlanmıştır.



Şekil 4.31. Samsun ili yıllık PV sıcaklığı değerleri

Şekil 4.32, Şanlıurfa ili için yıllık PV sıcaklığı değerlerini sunmaktadır. Bu il, sıcak iklim bölgesinde olması nedeniyle yıl boyu yüksek ışınım almaktadır. PV'nin elektrik ürettiği 08.00-20.00 saatleri arasında yıl boyunca PV sıcaklıkları referans PV sıcaklığının üzerindedir. Kış aylarında 5°C, ilkbahar aylarında 15°C, yaz ve sonbahar aylarında ise 35-40°C referans

sıcaklığın üzerine çıkmıştır. Eylül ayında ise PV sıcaklığı yıllık maksimum değeri olan 70°C'ye ulaşarak referans PV'ye göre 45°C yüksek sıcaklıkta çalışmaktadır. Şanlıurfa ili için 2 cm RT31 optimum verimi sağlayan FDM olarak belirlenmiştir. Bu uygulamaya ait yıllık PV sıcaklığı değerleri Şekil 4.32(b)'de verilmektedir. Buna göre, gün doğumundan önce PV/FDM sisteminin sıcaklığı referans PV'ye benzerdir. FDM uygulaması günlük en yüksek sıcaklık değerlerinin elde edildiği 12.00 civarında 10-20°C arasında sıcaklık düşümü sağlamıştır. Saat 16.00'dan sonra ise sıvı fazda bulunan FDM'nin, PV'ye göre daha geç soğuması nedeniyle Nisan-Kasım ayları arasında referans PV sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklar görülmektedir.



Şekil 4.32. Şanlıurfa ili yıllık PV sıcaklığı değerleri

Tablo 4.4'te seçilen iller için yıllık olarak en fazla sıcaklık düşümü sağlayan FDM'ler listelenmiştir. Tüm iller için 1 cm FDM uygulamaları en düşük performansı sağlamıştır. Yüksek güneş ışınımı alan bölgeler için 1 cm FDM uygulamasında RT31 tipi FDM'nin performansı diğer FDM'lere oranla daha yüksektir. Düşük ışınım alan illerde ise RT28HC tipi FDM'nin performansı diğerlerine oranla daha iyidir. RT42 ve RT44HC tipi FDM'ler tüm kalınlıklar için tamamen ergimediklerinden dolayı gizli ısı depolama kapasitelerini dolduramamışlardır. Bu nedenle sıcaklık düşümüne etkileri diğerlerine göre daha azdır. FDM kalınlığı arttırıldığında ise gizli ısı depolama miktarına ek olarak sistemin duyulur ısı depolama miktarı da artmaktadır.

Tablo 4.4. Yıllık performansı en iyi FDM uygulamaları

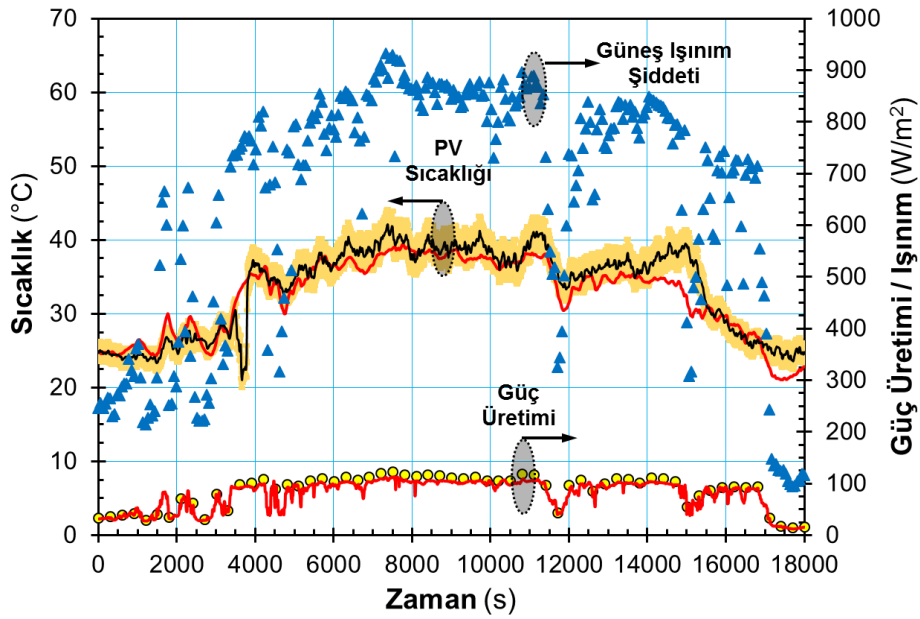
Şehir	Kalınlık	1 cm	2 cm	3 cm
Ağrı	PCM Türü	RT31	RT28	RT28
	% Sıcaklık Düşümü	9,12	20,08	25,86
	% Verim Artışı	3.49	5.09	5.26
Bursa	PCM Türü	RT35	RT28	RT28
	% Sıcaklık Düşümü	9,22	18,53	20,22
	% Verim Artışı	3.07	4.21	4.41
İzmir	PCM Türü	RT31	RT28	RT28
	% Sıcaklık Düşümü	9,77	20,10	21,11
	% Verim Artışı	3.73	4.40	4.53
Kırşehir	PCM Türü	RT28	RT28	RT28
	% Sıcaklık Düşümü	9,42	17,05	19,51
	% Verim Artışı	2.91	4.16	4.34
Mersin	PCM Türü	RT31	RT31	RT28
	% Sıcaklık Düşümü	11,60	20,77	22,57
	% Verim Artışı	3.60	4.97	5.15
Samsun	PCM Türü	RT28	RT28	RT28
	% Sıcaklık Düşümü	9,63	15,79	17,01
	% Verim Artışı	2.98	2.86	3.10
Şanlıurfa	PCM Türü	RT31	RT31	RT28
	% Sıcaklık Düşümü	10,27	20,21	22,89
	% Verim Artışı	3.04	5.28	5.73

Buna göre, 2 cm FDM uygulamasında tüm iller için sıcaklık düşümleri 1 cm uygulamasına göre yaklaşık 2 kat artmıştır. FDM kalınlığı 3 cm'ye çıkarıldığında ise sıcaklık düşümleri 1 cm uygulamasına göre yaklaşık 2,5 kat artmasına rağmen, 2 cm ile 3 cm uygulamalar arasında Ağrı ile dışında belirgin farklar bulunmamaktadır. Bu nedenle FDM maliyeti göz önüne alınarak tüm iller için optimum FDM kalınlığının 2 cm olduğu görülmektedir. 2 cm FDM uygulamalarında Mersin ve Şanlıurfa dışındaki tüm illerde performansı en iyi FDM RT28HC'dir. Mersin ve Şanlıurfa illerinde ise yüksek güneş ışınımı alan bölgede olmaları ve dış ortam sıcaklıklarının yıl boyunca yüksek olması sebebiyle RT31 tipi FDM tercih edilmelidir.

4.7 Deneysel Çalışmalar

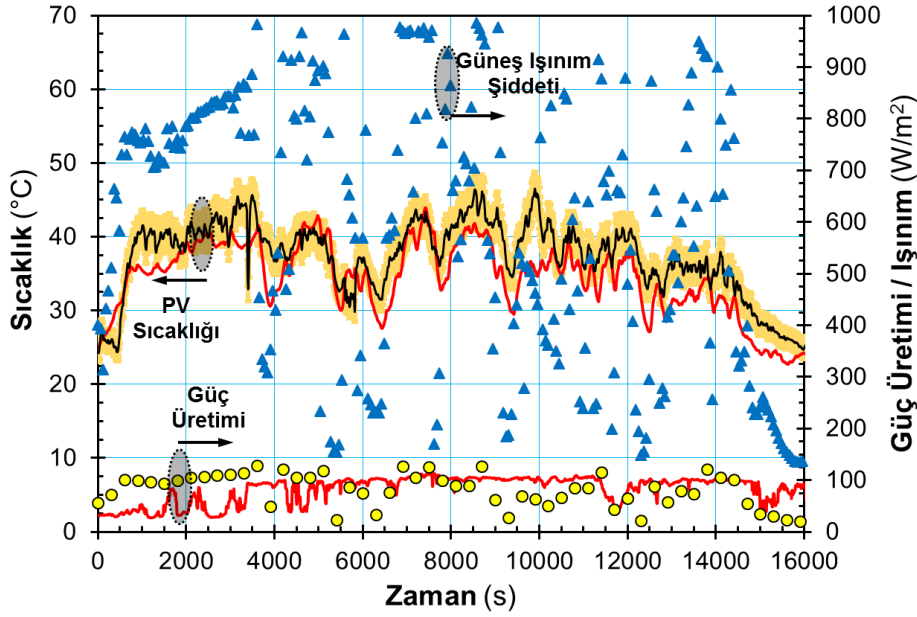
İzmir ili ilkbahar ve yaz mevsimine ait iklim koşullarında 6-7 Nisan ve 4-6 Temmuz tarihlerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Zamana bağlı PV sıcaklığı ve güç üretimi incelenmiştir. Şekil 4.33'te 6 Nisan tarihinde yapılan deney sonuçları verilmektedir. Şekildeki siyah çizgi deneysel olarak belirlenen PV sıcaklığı değişimini, sarı daireler ölçülen güç üretimi miktarını

temsil etmektedir. Kırmızı çizgiler ise sayısal olarak elde edilen PV sıcaklığı ve güç üretimi değerleridir. Deney saat 10.00 – 15.00 zaman aralığında toplam 18000 s boyunca yapılmıştır. Saat 10.00'dan önce güneş ışınımı şiddetinin 100 W/m^2 'nin altında olması nedeniyle PV elektrik üretmemektedir. Benzer şekilde saat 15.00'ten sonra Nisan ayı için güneş ışınım şiddeti 100 W/m^2 'nin altındadır. Deney boyunca gözlenen en yüksek PV sıcaklığı 4000 – 15000 s aralığında yaklaşık 40°C civarındadır. Bu zaman dilimi 11.15 – 14.15 saatlerine tekabül etmektedir. Güneş ışınım şiddetinin düştüğü saat 11.00 ve 13.30 civarında ($t = 3000$ ve 12000) PV sıcaklığı aniden düşmektedir. Şekil 4.33'ten sayısal sonuçlarla deneysel ölçümlerin uyum sağladığı görülmektedir.



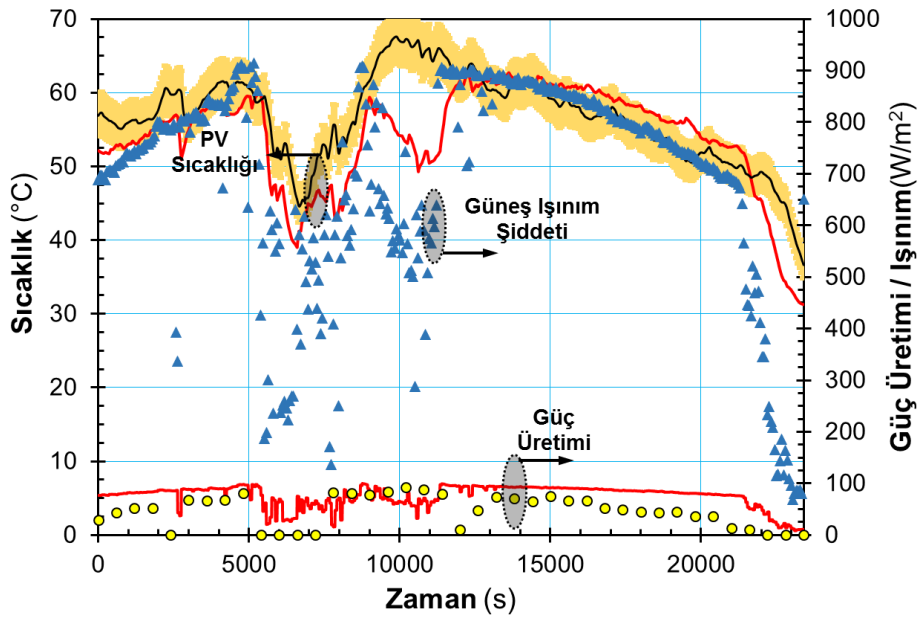
Şekil 4.33. 6 Nisan 2017- PV sıcaklığı ve güç üretimi sonuçları

Şekil 4.34'te 7 Nisan tarihinde yapılan deney sonuçları verilmiştir. Deney saat 10.30 – 15.30 saatleri arasında gerçekleştirilmiştir. Gün boyunca güneş ışınım şiddeti artıp azalmaktadır. Bu nedenle PV sıcaklığı $30\text{-}45^\circ\text{C}$ aralığında sürekli değişen bir eğri izlemektedir. Benzer şekilde güç üretim değerleri de $0\text{-}100 \text{ W/m}^2$ arasında değişmektedir. Kırmızı çizgilerle gösterilen sayısal çözüm sonuçlarının da deneysel verimlerle uygun şekilde değişim gösterdiği Şekil 4.34'ten görülmektedir.



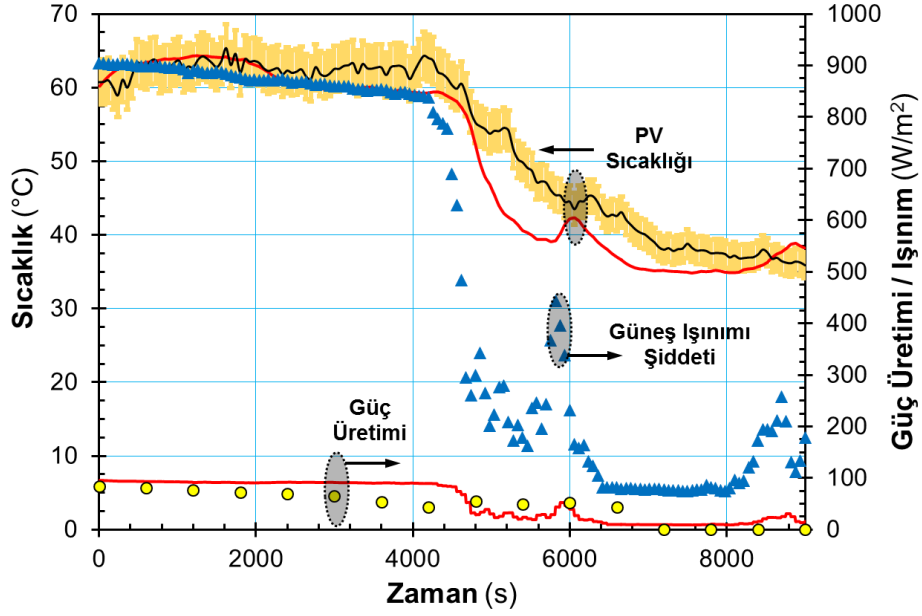
Şekil 4.34. 7 Nisan 2017- PV sıcaklığı ve güç üretimi sonuçları

4 Temmuz 2017 tarihinde saat 10.30 - 17.30 arasında yapılan deney sonuçları Şekil 4.35'te verilmektedir. PV sıcaklığının saat 13.30 civarında ($t = 10000$ s) 70°C 'ye kadar yükseldiği görülmektedir. Saat 12.00 – 13.30 civarında ($t = 5000 - 10000$ s aralığı) bulut geçişleri sebebiyle güneş ışınım şiddeti oldukça azalmaktadır. Buna bağlı olarak bu zaman aralığında PV sıcaklığı ve güç üretimi değerlerinde düşüşler gözlenmektedir. 12.00 – 12.30 saatleri arasında ($t = 5000 - 6000$ s) deneysel olarak ölçülen güç üretimi miktarı sıfırlanmıştır. Deneysel ölçüm belirsizliğine bağlı olarak anlık sapmalar gözlenirse de sayısal sonuçlarla deneysel ölçümlerin genel bir uyum içerisinde olduğu söylenebilir.



Şekil 4.35. 4 Temmuz 2017- PV sıcaklığı ve güç üretimi sonuçları

Şekil 4.36 6 Temmuz 2017 tarihinde saat 13.30 - 16.00 arası yapılan deney sonuçlarını vermektedir. Saat 14.40'a kadar ($t = 4000$ s), ışınım şiddeti 900 W/m^2 civarındadır ve PV sıcaklığının $60\text{-}70^\circ\text{C}$ arasında değişmektedir. Bu andan itibaren güneş ışınımı şiddeti giderek azalmış ve deney sonuna kadar 300 W/m^2 'nin altında ölçülmüştür. PV sıcaklığının da ışınım şiddetine bağlı olarak giderek azaldığı ve 40°C 'ye düştüğü görülmektedir. Saat 15.00'ten sonra ($t = 6300$ s) deneysel olarak ölçülen güç üretimi miktarının azalan güneş ışınımı şiddeti sebebiyle sıfırlandığı görülmektedir. Güneş ışınımının aniden düştüğü saatlerde sayısal sonuçlarla deneysel ölçümler arasında farklar olsa da genel olarak iki sonuç uyum içerisindedir.



Şekil 4.36. 6 Temmuz 2017 - PV sıcaklığı ve güç üretimi sonuçları

5 TARTIŞMA/SONUÇ

Proje kapsamında, PV panel arka yüzeyine farklı kalınlıklarda FDM haznesi yerleştirilerek pasif ısı kontrol sistemi oluşturulmuştur. İzmir iline ait meteorolojik veriler kullanılarak PV panelin ve PV/FDM sisteminin gerçek dış ortam koşullarındaki ısı davranışı sayısal olarak modellenmiştir. Ayrıca RT28HC, RT31, RT35HC, RT42 ve RT44HC olmak üzere 5 farklı ergime noktasına sahip FDM'nin Türkiye'nin değişik iklim kuşaklarının özelliklerini gösteren 7 il bazında PV panelin elektrik üretim verimliliğine etkileri araştırılmıştır. Daha sonra, FDM haznesi içerisindeki içe doğru ergime prosesi sırasında oluşacak doğal taşınım etkisi incelenerek iletim etkin çözümü sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca değişen sıcaklık farkları ve sıvı bölgesi genişlikleri için etkin ısı iletim katsayısına ait korelasyonlar elde edilmiştir. Aktif ısı kontrol uygulaması olarak sıcaklık kontrollü bir hava akış sistemi içeren PV/T ve PV/T/FDM sistemleri ANSYS-Fluent programı kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Buna göre projeden elde edilen belli başlı sonuçlar şu şekildedir:

- İletim ve/veya taşınım etkili PV ve PV/FDM sistemlerinin sayısal ortamda çözümü sağlayan ve doğrulanmış bir sayısal kod geliştirilmiştir.
- Yapılan parametrik analizler neticesinde:
 - Türkiye'de kış aylarında ısı kontrolcü kullanımına gerek olmadığı gözlenmiştir.
 - 2 cm kalınlığında FDM haznesi kullanımı tüm iklim bölgeleri için uygundur.
 - Mersin ve Şanlıurfa için RT31, diğer iller için ise RT28HC tipi FDM kullanımı ısı kontrol açısından uygun bulunmuştur.
- Smith vd., (2014) Avrupa'da FDM'nin PV ısı kontrolcüsü olarak kullanımına ilişkin %2-5 arasında verim artışı elde edilebileceğini belirtmiştir. Bu değerler, proje kapsamında elde edilen verim artışı değerleriyle uyumludur.
- 400 W/m² sabit güneş ışınımı altında iletim ve taşınım etkin modeller arasında belirgin bir fark yoktur. Işınım şiddetinin 800 W/m²'ye çıkartılması sıvı FDM içerisindeki doğal taşınım hareketliliğini arttırmakta ve iletim etkin modele göre PV sıcaklığının daha uzun süre FDM'nin ergime sıcaklığına yakın seviyelerde kalmasını sağlamaktadır.
- İnce FDM kaviteleri için iletim etkin ve taşınım etkin modeller arasında belirgin fark görülmemekle birlikte FDM kalınlığının artırılması iletim etkin çözümün doğruluğunu etkilemektedir. Örneğin 10 cm FDM kalınlığı için iletim etkin çözümdeki günlük ortalama güç üretimindeki artış %4,12 iken, taşınım etkin çözümde %9,7'dir. Özellikle kalın FDM hazneleri için FDM içerisindeki doğal taşınımın ihmal edilmesi önemli hatalara sebep olmaktadır.

- FDM kavitesinin 1 cm'den daha kalın olması durumunda iletim etkin çözümlene kullanılması durumunda arayüzey pozisyonlarının veya sıvı FDM oranının doğru belirlenebilmesi mümkün değildir.
- Önerilen etkin ısı iletim katsayısı ile 1-boyutlu iletim çözümlerine taşınım etkisi dahil edilerek sayısal kodun daha etkin kullanımı mümkün olabilecektir.
- PV/T ve PV/FDM sistemlerinin ısı ve elektriksel performansını sayısal ortamda farklı tip kontrolcüler için incelemeye imkan veren hesaplama yöntemi başarıyla oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlara göre FDM uygulaması özellikle kısa süreli hava akışının aktif olduğu PV/T sistemlerinden elektriksel verimi olumlu yönde etkilemektedir.

KAYNAKÇA

- Aste, N., Del Pero, C., Leonforte, F., Manfren, M. (2016). Performance monitoring and modeling of an uncovered photovoltaic-thermal (PVT) water collector. *Solar Energy*, 135, 551-568.
- Bejan, A. (2013). *Convection Heat Transfer*. John Wiley & Sons.
- Brent, A. D., Voller, V. R., & Reid, K. T. J. (1988). Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: application to the melting of a pure metal. *Numerical Heat Transfer, Part A Applications*, 13(3), 297-318.
- Browne, M. C., Norton, B., McCormack, S. J. (2015). Phase change materials for photovoltaic thermal management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 762-782.
- Cao, Y., & Faghri, A. (1990). A numerical analysis of phase-change problems including natural convection. *Journal of Heat Transfer*, 112(3), 812-816.
- Cellura, M., Ciulla, G., Brano, V. L., Marvuglia, A., Orioli, A., 2008, A Photovoltaic Panel Coupled with a Phase Changing Material Heat Storage System in Hot Climates, PLEA 2008 – 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin.
- Çengel, Y. A., Ghajar, A. J. (2014). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications*. McGraw-Hill.
- Chapra, S. C., Canale, R. P., 1998, *Numerical methods for engineers (Vol. 2)*. New York: McGraw-Hill.
- Costa, M., Oliva, A., Segarra, C. F., & Alba, R. (1991). Numerical simulation of solid-liquid phase change phenomena. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 91(1-3), 1123-1134.
- de Vahl Davis, G. (1983). Natural convection of air in a square cavity: a bench mark numerical solution. *International Journal for numerical methods in fluids*, 3(3), 249-264.
- Desai, C. P., & Vafai, K. (1993). A unified examination of the melting process within a two-dimensional rectangular cavity. *Journal of Heat Transfer*, 115(4), 1072-1075.
- Evans, D. L., Florschuetz, L. W., 1977, Cost studies on terrestrial photovoltaic power systems with sunlight concentration. *Solar Energy*, 19(3), 255-262.
- Gau, C., & Viskanta, R., (1986). Melting and Solidification of a Pure Metal on a Vertical Wall. *Journal of Heat Transfer*, 108, 174-181.

- Gaur, A., Tiwari, G. N., Ménézo, C., Al-Helal, I. M. (2016). Numerical and experimental studies on a Building integrated Semi-transparent Photovoltaic Thermal (BiSPVT) system: Model validation with a prototype test setup. *Energy Conversion and Management*, 129, 329-343.
- Hachem, F., Abdulhay, B., Ramadan, M., El Hage, H., El Rab, M. G., Khaled, M. (2017). Improving the performance of photovoltaic cells using pure and combined phase change materials–Experiments and transient energy balance. *Renewable Energy*, 107, 567-575.
- Hasan, A., Alnoman, H., Rashid, Y. (2016). Impact of integrated photovoltaic-phase change material system on building energy efficiency in hot climate. *Energy and Buildings*, 130, 495-505.
- Hasan, A., Sarwar, J., Alnoman, H., Abdelbaqi, S. (2017). Yearly energy performance of a photovoltaic-phase change material (PV-PCM) system in hot climate. *Solar Energy*, 146, 417-429.
- Hendricks, J. H. C., ve W. G. J. H. M. Sark, 2013, Annual performance enhancement of building integrated photovoltaic modules by applying phase change materials, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 21.4, 620-630.
- Incropera, F. P., De Witt, D. P. (1985). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons.
- Kibria, M. A., Saidur, R., Al-Sulaiman, F. A., Aziz, M. M. A. (2016). Development of a thermal model for a hybrid photovoltaic module and phase change materials storage integrated in buildings. *Solar Energy*, 124, 114-123.
- Lee, S. L. (1990). A strongly implicit solver for two-dimensional elliptic differential equations. *Numerical Heat Transfer, Part B Fundamentals*, 16(2), 161-178.
- Luo, Z., Huang, Z., Xie, N., Gao, X., Xu, T., Fang, Y., Zhang, Z. (2017). Numerical and experimental study on temperature control of solar panels with form-stable paraffin/expanded graphite composite PCM. *Energy Conversion and Management*, 149, 416-423.
- Mahamudul, H., Rahman, MD.M., Metselaar, H.S.C., Mekhilef, S., Shezan, S.A.S, Sohel, R., Karim, S.B.A., Badiuzaman, W.N.I., 2016, *Temperature Regulation of Photovoltaic Module Using Phase Change Material: A Numerical Analysis and Experimental Investigation*, Hindawi Publishing Corporation.
- Mahdi, H. S., Kinney, R. B. (1990). Time-dependent natural convection in a square cavity: Application of a new finite volume method. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 11(1), 57-86.

Markatos, N. C., Pericleous, K. A. (1984). Laminar and turbulent natural convection in an enclosed cavity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 27(5), 755-772.

Michael, J. J., Selvarasan, I., Goic, R. (2016). Fabrication, experimental study and testing of a novel photovoltaic module for photovoltaic thermal applications. *Renewable Energy*, 90, 95-104.

Nahar, A., Hasanuzzaman, M., Rahim, N. A. (2017). Numerical and experimental investigation on the performance of a photovoltaic thermal collector with parallel plate flow channel under different operating conditions in Malaysia. *Solar Energy*, 144, 517-528.

Patankar, S. V., 1980, *Numerical heat and fluid flow*. Hemisphere, New York.

Preet, S., Bhushan, B., Mahajan, T. (2017). Experimental investigation of water based photovoltaic/thermal (PV/T) system with and without phase change material (PCM). *Solar Energy*, 155, 1104-1120.

Rubitherm GmbH, <https://www.rubitherm.eu/en>

Saygin, H., Nowzari, R., Mirzaei, N., Aldabbagh, L. B. Y. (2017). Performance evaluation of a modified PV/T solar collector: A case study in design and analysis of experiment. *Solar Energy*, 141, 210-221.

Slimani, M. E. A., Amirat, M., Kurucz, I., Bahria, S., Hamidat, A., Chaouch, W. B. (2017). A detailed thermal-electrical model of three photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid air collectors and photovoltaic (PV) module: comparative study under Algiers climatic conditions. *Energy Conversion and Management*, 133, 458-476.

Smith, C. J., Forster, P. M., Crook, R., 2014, Global analysis of photovoltaic energy output enhanced by phase change material cooling. *Applied Energy*, 126, 21-28.

Soares, N., Antunes, P., Gaspar, A. R., Costa, J. J. (2017). Thermal management of photovoltaics with thermal energy storage units filled with microencapsulated PCMs. In *Energy for Sustainability International Conference 2017-Designing Cities & Communities for the Future*.

Stropanik, R., Stritih, U., 2016, Increasing the efficiency of PV panel with the use of PCM, *Renewable Energy*, 97, 671-679.

Tabet, I., Touafek, K., Bellel, N., Khelifa, A., Baissi, M. (2017). Thermal Performance of Flat Plate Solar Collector with Reflectors in South Algeria. *Journal of Sustainable Energy*, 8(2).

TÜMAS, <http://tumas.mgm.gov.tr/>



Wang, S., Faghri, A., Bergman, T. L. (2010). A comprehensive numerical model for melting with natural convection. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(9), 1986-2000.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Yrd. Doç. Dr. MEHMET AKİF EZAN
Proje No:	315M242
Proje Başlığı:	Faz Değişim Malzemeli Fotovoltaik Güç Üretim Sisteminin Sayısal Ve Deneysel İncelenmesi
Proje Türü:	3001 - Başlangıç AR-GE
Proje Süresi:	18
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	AHMET YILANCI
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	DOKUZ EYLÜL Ü. MÜHENDİSLİK F. MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/04/2016 - 01/10/2017
Onaylanan Bütçe:	92250.0
Harcanan Bütçe:	55760.0
Öz:	<p>Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenen bu projenin amacı, fotovoltaik panelin gün içerisinde artan hücre sıcaklığını pasif (Faz değişim malzemesi) ve aktif (hava kanalı) ısı kontrol yöntemleri yardımıyla düşürmek ve bu yöntemlerin elektrik üretim verimliliği üzerine etkilerini incelemektir. Bu kapsamda, farklı tip faz değişim malzemeleri fotovoltaik panel pasif ısı kontrolcüsü olarak denenmiştir. Türkiye'nin 7 farklı iklim bölgesi için zamana bağlı yıllık analizler gerçekleştirilmiştir. Aktif kontrolcü olarak ise hava kanalı içeren Fotovoltaik/Termal (PV/T) sistem incelenmiştir. Sistemde akışkan debisi parametrik olarak değiştirilmiş ve debinin bütünlük verime etkisi gözlenmiştir.</p>
Anahtar Kelimeler:	Fotovoltaik panel ısı kontrolü, Faz değişim malzemesi, Etkin ısı iletim katsayısı
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	<p>1- A numerical study on passive cooling system of a photovoltaic panel (Tez (Araştırmacı Yetiştirilmesi) - Yüksek Lisans Tezi), 2- Türkiye'nin Farklı İklim Bölgeleri için Fotovoltaik Panel Isıl Kontrolcüsü Modellenmesi (Bildiri - Ulusal Bildiri - Sözlü Sunum), 3- PV/FDM Sistemindeki Doğal Taşınımın Sayısal Modellenmesi (Bildiri - Ulusal Bildiri - Sözlü Sunum), 4- Bina Entegreli Fotovoltaik Panel Isıl Kontrolcüsünün Sayısal Modellenmesi (Bildiri - Ulusal Bildiri - Sözlü Sunum),</p>