

**EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**(DOKTORA TEZİ)**

**MODEL BİR PV/T TROMBE DUVARIN ENERJİ**

**ANALİZİ**

**Başak KUNDAKCI KOYUNBABA**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Koray ÜLGEN**

**İkinci Danışmanı : Prof. Dr. Zerrin YILMAZ**

**Güneş Enerjisi Enstitüsü Anabilim Dalı**

**Bilim Dalı Kodu : 625.05.04**

**Sunuş Tarihi : 04.02.2010**

**Bornova-İZMİR**

**2010**



## ÖZET

### MODEL BİR PV-T TROMBE DUVARIN ENERJİ ANALİZİ

KUNDAKCI KOYUNBABA, Başak

Doktora Tezi, Güneş Enerjisi Enstitüsü

Tez Yöneticisi: Yrd. Doç. Dr. Koray ÜLGEN; Prof. Dr. Zerrin YILMAZ

Şubat 2010, 113 sayfa

Günümüzde kullanılan ticari güneş pilleri %20'den daha düşük bir verimle güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürebilmekte ve dönüşüm verimi, sıcaklık artışı ile ters orantılı olarak azalmaktadır. Güneş pillerindeki sıcaklık artışını önleyebilmek için kullanım amacına göre değişik formda ve yapılarda PV/T hibrit sistemler geliştirilmiştir.

Binaların güneş alan cepheleri ile bütünleştirilen veya bina kabuğu olarak da kullanılabilecek PV/T hibrit sistemler güneş enerjisi uygulamalarının yeni bir türüdür. Burada amaç binaların güneş alan cephelerinde, güneş enerjisinden aynı anda hem elektrik enerjisi üretmek, hem de binaların ihtiyaç duydukları ısı enerjisini veya sıcak suyu karşılayabilmektir.

Bu çalışma kapsamında, elektrik üretiminde kullanılan PV modül ve konut ısıtmasında kullanılan güneş duvarının birleşik bir sistem olarak kullanılması sonucu ortaya çıkan BEPV/T sistem ele alınmış ve Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü'nün zemin katındaki laboratuvarın içine bir test odası inşa edilmiştir. Test odası Ege Üniversitesi'nin katkıları ile inşa edilmiştir. Sistemin sıcaklık verileri ve sisteme gelen ışınım verilerini almak üzere TÜBİTAK'ın katkıları ile datalogger, piranometre ve sensörler satın alınmış ve bu cihazlar sayesinde sistemin ölçüm sonuçları 10 dakikada bir alınarak bilgisayara

kaydedilmiştir. Alınan ölçüm sonuçları kullanılarak CFX programında sistemin simülasyonu yapılmış ve hesap sonuçları, deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak modelin doğruluğu onaylanmıştır. Sistemde kullanılan yarı-geçirgen güneş pilinin geçirgenliğinin %10 olduğu, PV yüzeyinde ve duvarın ara boşluğa bakan yüzeyinde ışıyım ölçümleri yapılarak tespit edilmiştir. Yarı-geçirgen güneş pilinin elektriksel verimi %4,5 olup, elektriksel verimin sıcaklığa bağlı değişimi Bulgular ve Tartışma kısmında yorumlanıp değerlendirilmiştir. Sistemin 05 Şubat tarihindeki ortalama termal verimi %20,3 bulunmuştur.

Araştırmanın amacı, teorik bir model geliştirmek ve bu tür uygulamalar için performans değerlendirmesi yapmaktır. Oluşturulan bu model sayesinde sistem inşa edilmeden, farklı yerleşim yerlerinde, farklı ara boşluk kalınlıkları için, farklı duvar tiplerinde, farklı menfez açıklıkları için ve farklı özellikteki güneş pilleri için denenip o lokasyon için optimizasyona gidilmesi sağlanabilecektir.

Bu sistem, yeni inşa edilecek binalara uygulanabileceği gibi mevcut binaların iyileştirilmesinde de kullanılabilmesi açısından önemlidir.

**Anahtar sözcükler:** Güneş pili, güneş duvarı, PV/T sistem, enerji analizi.

**ABSTRACT****THE ENERGY ANALYSIS OF A MODEL PV/T TROMBE WALL**

KUNDAKCI KOYUNBABA, Başak

PhD in Solar Energy Institute

Supervisor: Yrd. Doç. Dr. Koray ÜLGEN; Prof. Dr. Zerrin YILMAZ

February 2010, 113 sayfa

Commercial PV's used today convert solar energy to electricity with less than 20% efficiency and conversion efficiency has changed opposite to temperature increase. In order to prevent the increase in temperature several PV/T hybrid systems are developed in different forms and structures.

PV/T hybrid systems, which should be united with buildings front sides or building shelves, are new types of solar energy implementations. The aim is to supply both electrical and heat energy for buildings from solar energy by using sun receiving sides.

In this study, the hybrid BIPV/T system that consists of PV module for electricity generation and thermal mass for building heating is studied and a test room is built in the laboratory of the basement of Ege University Solar Energy Institute. The test room was built with the support of Ege University. Data logger, pyranometer and sensors were bought with the contribution of TÜBİTAK to measure the temperature and the radiation data. These devices record the data they measure every 10 minutes. Using the measurement results, the simulation of the system is made in CFX; the simulation and the measurement results are compared to verify the correctness of the simulation. The transmittance of the semi-transparent photovoltaic module is calculated as 10% from the radiation data measured on the PV module and on the surface of the façade facing inter-space. The electrical efficiency of the semi-transparent PV module is 4,5% and the electrical efficiency depending on the temperature is commented on and evaluated in Section "Results and Discussion". The overall thermal efficiency on February, 5<sup>th</sup> is 20,3%.

The aim of this thesis is to develop a theoretical model to make performance evaluations for such applications. Via this simulation model, the optimization will be provided before constructing this system for different locations, inter-space distances, wall types, vent openings and for solar cells with different properties.

This system can both be applied to new buildings and to existing buildings as a renovation.

**Keywords:** Photovoltaic, solar wall, PV/T system, energy analysis.

## TEŞEKKÜR

Hocam Yrd. Doç. Dr. Koray Ülgen'e, birlikte çalışmayı bir şans olarak gördüğüm ve uzakta olmasına rağmen hep yanımda olan sevgili hocam Prof. Dr. Zerrin Yılmaz'a, yapıcı eleştirileri ile tezimize çok değerli katkılar sağlayan Prof. Dr. Ali Güngör'e, sistemin inşası ve ölçüm sisteminin alınması için katkı sağlayan Ege Üniversitesi ve TÜBİTAK'a, sistemimizde eksik kalan ölçümlerin alınması için kendi projesindeki datalogger'ı kullanmamıza izin veren Emre Akın'a, hayatımın en güzel yıllarını geçirmemi sağlayan eşim Erce Koyunbaba'ya, canım annem Hatice Kundakcı ve babam Prof. Dr. Akif Kundakcı'ya teşekkürü bir borç bilirim.



**İÇİNDEKİLER**

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	v
ABSTRACT .....	vii
TEŞEKKÜR .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvii
1.GİRİŞ .....	1
2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	5
3.FOTOVOLTAİK/TERMAL (PV/T) SİSTEMLER .....	17
3.1 Fotovoltaik/Termal (PV/T) Kolektörler .....	17
3.1.1 PV/T havalı kolektörler .....	18
3.1.2 PV/T sulu kolektörler .....	19
3.1.3 Yoğunlaştırılmalı PV/T güneş kolektörleri.....	20
3.2 Binaya Entegre Fotovoltaik Termal Sistemler (BEPV/T).....	21
3.2.1 Çatıya entegre BEPV/T sistemler.....	23
3.2.2 Bina cephesine entegre BEPV/T sistemler.....	24

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<u>Sayfa</u>
4. BİNAYA ENTEGRE BİR PV/T SİSTEMİN ENERJİ MODELLEMESİ İÇİN BİR YAKLAŞIM.....	27
4.1 Deney Düzenegi.....	27
4.1.1 Yarı-geçirgen güneş pilleri.....	27
4.1.2 Test odasının tasarımı ve kurulumu .....	30
4.1.3 Kullanılan cihazlar .....	36
4.1.4 Deneysel çalışma.....	39
4.2 Hesap Modeli .....	40
4.2.1 Teorik Model ve Problemin Tanımı.....	42
4.2.2 CFX kullanılarak çözüm .....	50
5. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	55
6. SONUÇ .....	77
7. ÖNERİLER.....	81
KAYNAKLAR .....	83
EKLER.....	89
ÖZGEÇMİŞ .....	113

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 PV modül, termal kolektör ve PV/T sistemin kıyaslamalı görünümü ....	5
3.1 PV/T havalı kolektör modeli .....	18
3.2 PV/T havalı kolektörün farklı uygulama örnekleri .....	19
3.3 PV/T sulu kolektör modeli .....	20
3.4 Yoğunlaştırılmalı PV/T güneş kolektörü modeli.....	21
3.5 BEPV/T sistemlerin detaylandırılmış sınıflandırması.....	22
3.6 Brezilya'daki Florianopolis Uluslararası Havaalanı .....	23
3.7 Beijing Olimpiyat Köyü merkez binası BEPV/T sistem çatı uygulaması	24
3.8 Montreal Kanada'da John Molson School of Business binası BEPV/T sistem cephe uygulaması .....	25
3.9 BEPV/T sistemin çalışma prensibi.....	25
4.1 RWE Schott Solar firmasının yarı saydam ince-film a-Si tandem güneş modülünün görünüşü .....	28
4.2 Test odasının planı.....	30
4.3 Test odasının kesiti .....	31
4.4 Test odasının güney cephesinin görünüşü .....	31
4.5 Test odasının demir profiller ile strüktürünün tamamlanması .....	33
4.6 Alçıpan plakaların profillere vidalanarak çerçevenin tamamlanması ....	33

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.7 Alçıpan plakaların arasının camyünü ile yalıtılması.....	34
4.8 Alçıpan plakalar ile dış ortamdan yalıtılması .....	34
4.9 Termal kütlelerin inşası ve iç ortam XPS ile yalıtılması .....	35
4.10 PVC kapı ve menfezlerin takılıp, sıkıştırılmış camyünü ile yalıtılması; Tavan ve tabanın XPS, laminat parke ve PVC plakalarla yalıtılması ...	35
4.11 Datalogger kurulumu ve sensörlerin yerlerinin tespit edilip takılması..	38
4.12 Datalogger'in bataryasını şarj eden PV ile dış ortam sıcaklık ve nem sensörünün dış cidara yerleştirilmesi.....	38
4.13 Deney düzeneğinde sıcaklık sensörlerinin yerleşimi.....	39
4.14 ANSYS kullanılarak sistemin genel çözüm yöntemi .....	43
4.15 Sistem geometrisi.....	45
4.16 ANSYS CFX'in Yapısı.....	50
4.17 Sistemin ağ yapılandırması yapılmış durumu.....	51
5.1 Güneş pili veriminin PV hücre sıcaklıklarına göre saatlik değişimi .....	60
5.2 Havanın kütsel debisinin, ara boşluk ve iç ortam sıcaklıklarına bağlı saatlik değişimi .....	63
5.3 Dış ortam sıcaklığının dikey düzleme gelen toplam güneş ışınımına bağlı saatlik değişimi .....	66
5.4 Dış ve iç kabuk üzerine gelen toplam güneş ışınımının saatlik değişimi	68

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.5 Dış ortam, ara boşluk, iç ortam, üst ve alt menfezlerdeki sıcaklıkların saatlik değişimi.....	69
5.6 Üst menfezdeki hava sıcaklıklarının saatlik değişiminin ölçüm ve hesaplanan değerleri.....	70
5.7 Alt menfezdeki hava sıcaklıklarının saatlik değişiminin ölçüm ve hesaplanan değerleri.....	71
5.8 Duvar iç yüzey sıcaklıklarının saatlik değişiminin ölçüm ve hesaplanan değerleri.....	71
5.9 İç ortam sıcaklıklarının saatlik değişiminin ölçüm ve hesaplanan değerleri.....	72
5.10 Ara boşluk sıcaklıklarının saatlik değişiminin ölçüm ve hesaplanan değerleri.....	72
5.11 Duvar dış yüzey sıcaklıklarının saatlik değişiminin ölçüm ve hesaplanan değerleri.....	73
5.12 Güneş pilinin yüzey sıcaklıklarının saatlik değişiminin ölçüm ve hesaplanan.....	73
5.13 Duvar yüzeyinden iç ortama olan ısı geçişinin saatlik değişimi (5 Şubat günü için).....	75
5.14 Duvar yüzeyinden iç ortama olan ısı geçişinin saatlik değişimi (28 Ocak günü için).....	75

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.1 Güneş modülünün elektriksel verisi.....	28
4.2 Güneş modülünün boyutları ve ağırlığı .....	29
4.3 Güneş modülünün karakteristik verisi .....	29
4.4 Güneş modülünün hücre sıcaklık katsayıları .....	29
4.5 Test odasında kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri.....	36
4.6 Ölçüm Amaçlı kullanılan cihaz ve sensörler .....	37
5.1 Menfezlerin açılış ve kapanış saatleri .....	56
5.2 04–07 Şubat tarihleri arası saatlik Güneş ışınlamı, $T_{dış}$ , $T_{PV}$ , $T_{ara}$ , $m$ değerleri	57
5.3 04–07 Şubat tarihleri arası saatlik $\eta_{oth}$ değerleri .....	58

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$A_r$	Üst menfez alanının alt menfez alanına oranı ( $A_{ust}/A_{alt}$ ).
$A_{duvar}$	Trombe duvarın alanı ( $m^2$ ).
$B$	Genişlik (m).
$c_d$	Hava kanalının boşalma katsayısı.
$c$	Özgül ısı (kJ/kgK).
$D$	Kalınlık (m).
$E$	PV hücrelerin ürettiği elektriksel güç oranı ( $W/m^2$ ).
$E_T$	Enerji tasarrufu verimi.
$g$	Yerçekimi ivmesi ( $9,80655 m/s^2$ ).
$h_{co}$	PV'nin dış yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı ( $W/m^2K$ ).
$h_{ci}$	PV'nin iç yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı ( $W/m^2K$ ).
$h_{ro}$	PV'nin dış yüzeyindeki ışınlım katsayısı ( $W/m^2K$ ).
$h_{ri}$	PV'nin iç yüzeyindeki ışınlım katsayısı ( $W/m^2K$ ).
$h_{di}$	Duvarın iç yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı ( $W/m^2K$ ).
$h_{do}$	Duvarın dış yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı ( $W/m^2K$ ).

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$I$	Dikey düzlemde birim alana düşen toplam ışınım ( $W/m^2$ ).
$\dot{m}$	Kütleli debi ( $kg/s$ ).
$T$	Sıcaklık ( $^{\circ}C$ , $K$ ).
$V$	Hava hareketi hızı ( $m/s$ ).
$Q$	Isı transferi miktarı ( $W$ ).
<i>Grek semboller</i>	
$\alpha$	PV'nin yutuculuk katsayısı.
$\alpha_d$	Duvarın ara boşluğa bakan yüzündeki yutuculuk katsayısı.
$\beta$	Isıl genişleme katsayısı ( $K^{-1}$ ).
$\xi_1, \xi_2, \xi_3$	Yayma katsayısı.
$\rho$	Özgül ağırlık ( $kg/m^3$ ).
$\eta$	Pilin elektriksel verimi.
$\eta_{th}$	Günlük termal verim.
$\eta_{oth}$	Ortalama termal verim.
$\eta_T$	Pilin toplam verimi.
$\varepsilon$	PV hücre alanı oranı.

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$\lambda$	Isı iletkenlik katsayısı (W/mK).
$\tau$	Geçirgenlik katsayısı.
$\sigma$	Stefan Boltzman Sabiti ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ).
<i>Alt indis</i>	
alt	Alt menfez.
ara	Ara boşluk.
d	Duvar.
di	Duvarın iç ortama bakan yüzeyi.
dis	Dış ortam.
do	Duvarın ara boşluğa bakan yüzeyi.
G	cam.
hava	ara boşluktaki hava.
isnim	Işınım.
konveksiyon	Konveksiyon.
PV	PV hücre.
r	Referans.
ust	Üst menfez.

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
BEPV/T	Binaya entegre PV/T sistem.
HAD	Hesaplama akışkanlar dinamiği.
PV/T	Fotovoltaik termal sistem.

## 1. GİRİŞ

Enerji, teknolojinin hızla geliştiği günümüz dünyasında, hayatımızın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Bununla birlikte, doğal enerji kaynaklarının hızla tükenmesi, çevre kirliliği ile birlikte ekolojik dengenin bozulmaya başlaması ve enerji üretiminin yüksek maliyeti, enerjinin verimli ve etkin kullanılmasıyla birlikte, farklı ve temiz kaynaklardan üretilmesi konusunda çok daha duyarlı olmayı gerektirmektedir.

Ülkemizde enerjinin önemli bir bölümünün binaların ısıtılması, soğutulması ve iklimlendirilmesi için harcandığı bilinmektedir. Bu nedenle, binalarda iklimsel konfor koşullarının sağlanması için ısıtma, soğutma, havalandırma ve iklimlendirme yüklerinin en aza indirilmesi gerekliliği yanında, ekolojik ve enerji etkin tasarımı beraberinde getirmektedir.

İklimsel konfor, yapma çevre değişkenleri ve yapma ısıtma sistemlerinin enerji ekonomisi sağlayacak şekilde uygulanması ile kontrol altına alınmalıdır. Araştırmacılar çalışmalarını, yenilenebilir enerji kaynakları arasında birincil öneme sahip olan güneş enerjisi üzerine yoğunlaştırmışlar, birçok teorik ve deneysel çalışma gerçekleştirerek olumsuzlukları sınırlama arayışına gitmişlerdir.

Günümüzde güneş enerjisinden ısı üreten sistemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler sıcak su ihtiyacını karşılamak kadar iç mekân ısıtmasında da kullanılmaktadır. Güneş enerjisinden fotovoltaiik dönüşüm ilkesinden yararlanılarak güneş pilleri (PV) aracılığıyla elektrik enerjisi de elde edilmektedir. Güneş pilleri tarafından soğurulan güneş ışınımının çoğu elektrik enerjisine dönüştürülmez ve hücre sıcaklığını artırarak elektriksel verimi düşürür. PV sıcaklığı uygun bir doğal ya da zorlanmış akışkan dolaşımı ile yapılan soğutma yoluyla düşürülebilir. Bu amaçla son yıllarda PV modüllerin tek başına kullanılmasına bir seçenek olarak aynı anda elektrik ve ısı enerjisi üretebilen, bir PV modülün soğutma donanımı ile birlikte kullanıldığı hibrit güneş pili/termal (PV/T) sistemleri üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır.

Günümüzde kullanılan ticari güneş pilleri güneş enerjisini %20'den daha düşük bir verimle elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Bu sistemlerde güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde, gelen enerjinin en çok %20'sinden yararlanılmaktadır (Huang et al., 2001). Bu nedenle enerji verimini artırmak için termal toplayıcılar veya duvarlar fotovoltaiik hücrelerle birleştirilerek

elektrik enerjisi ve ısı elde etmek üzere gelen güneş enerjisinden daha fazla yararlanma olanağı sunan hibrit enerji üreticileri geliştirilme çabaları artarak sürmektedir.

Güneşten gelen enerji öncelikle güneş pilleri tarafından soğrulur, bunun yaklaşık %10'u geçirilir, %20'si elektrik enerjisine dönüştürülür, kalanı ise ısı enerjisine dönüştürülerek duvarla arasından geçen çalışma akışkanının ısınmasına neden olur.

Sistemin çalışması sırasında bir ısı taşıyıcı akışkan oluşan ısıyı, güneş pilinden uzaklaştırır. Fotovoltaik dönüşüm verimi, pil sıcaklığı arttıkça azaldığından, ısı taşıyıcı akışkan tarafından soğutulan bu güneş pilleri düşük ve kararlı bir sıcaklıkta güç çıkışını arttıracak şekilde çalışır. Bu yolla PV/T sistemler, güneş enerjisini hem elektrik hem de ısıl enerjiye dönüştürmektedir (Sandnes and Rekstad, 2002). Elektrik enerjisinin yanında toplanan ısı, evlerin, okulların ve işyerlerinin ısınma gereksinimini karşılamak amacıyla kullanılabilir.

Hibrit PV/T sistemlerinin toplam enerji çıkışı (elektriksel + ısıl), güneş enerjisi giriş açısı, ortam sıcaklığı, rüzgâr hızı, sistem bileşenlerinin çalışma sıcaklığı ve soğutma moduna bağlıdır. Sistemde elektriksel çıkış önceliklidir ve termal birimin çalışma koşulları buna bağlı olarak adapte edilmelidir (Tripanagnotopoulos et al., 2002).

Bu hibrit PV/T sistemin ana üstünlükleri şunlardır:

1. Hibrit PV/T sistemlerin kapladığı alandan üretilen elektrik ve ısı enerjileri, karşılık gelen alanın yarısının PV paneller ve diğer yarısının güneşli toplayıcılarla kaplanması durumunda elde edilecek enerjiden daha fazladır. Çatılarda ve kör cephelerde daha az alan kaplaması üstünlüğüdür.
2. PV/T sistemler, mimari açıdan binaların güneşe bakan kör cephelerine uygulanabildiği için bina kabuğunun ısı ve elektrik enerjileri açısından üretken hale getirilmesinde önemli rol oynar.
3. Geçirgen örtü ve kasa her iki panelin ortak bileşenleri olduğundan ve birleşik bir sistemde paylaşıldıklarından dolayı güneş pili / termal

(PV/T) toplayıcı, termal ve PV panellerin ayrı ayrı kullanılmasına oranla daha ekonomiktir (Loferski et al., 1982).

4. Termal güneş duvarı ile güneş pili arasında hava akışı ile sıcaklığın düşürülmesinden dolayı bir PV/T sistemdeki ortalama PV sıcaklığı ayrık bir PV modülün sıcaklığından daha düşük olur, buna bağlı olarak elektriksel verim de artar.

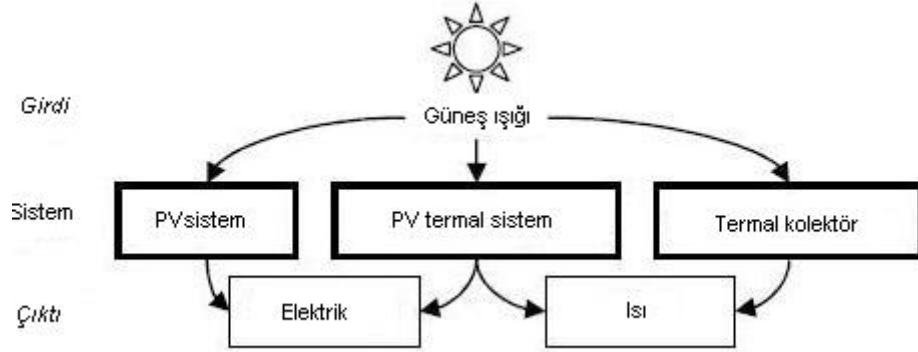
Birleşik güneş pili ve güneş duvarı kullanımı binaların güneye bakan cephelerine uygulandığında hem alan tasarrufu ve ısı yalıtımı sağlamakta hem de elektrik üretimini bir arada gerçekleştirmektedir. Aynı zamanda sıcak mevsimde güneş pili ile duvar arasındaki havayı bina dışına yönlendirerek, mekânın soğutma yükünü azaltmaktadır.

Güneş pili ve güneşli toplayıcının bir tasarımda birleştirilmesi her ikisinin de karakteristiğini değiştirmektedir. Panelin ortama olan ısı kayıplarını azaltmak amacıyla ek bir cam örtüsü kullanılmaktadır. Buna bağlı olarak PV hücrelerin elektriksel çıkışı, toplayıcının giriş sıcaklığı ve bu örtüdeki ek yansıma tarafından etkilenecektir (Zondag et al., 2002). Bu kapsamda deneysel bir düzenek geliştirilerek, güneş pilindeki performans değişimi ile güneş duvarının tam geçirimli bir cama göre ne gibi bir farklılık ortaya koyacağı da bu çalışma kapsamında araştırılmıştır.



## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Elektrik üretiminde kullanılan PV modül ve ısı üretiminde kullanılan termal kolektörün birleşik bir sistem olarak kullanılması sonucu ortaya çıkan PV/T sistemin kıyaslaması Şekil 2.1’de görülmektedir.



Şekil 2.1 PV modül, termal kolektör ve PV/T sistemin kıyaslamalı görünümü.

Bu mantık çerçevesinde geliştirilen sistemlerde amaç, aynı alan içerisinde hem ısı hem de elektrik üretiminin birlikte yapılmasını sağlayarak kombine (hibrit) bir cihaz ortaya koymaktır. Yapılan literatür taraması sonucunda, elektrik ve ısı üretimini birlikte yapan PV/T sistem olarak, çoğunlukla güneş kolektörleri ile güneş pillerinin bütünleştirilmesi neticesinde ortaya konan sistemler üzerine yoğunlaşmıştır. PV/T sistem ile ilgili yapılan önceki çalışmalar kronolojik sıra ile aşağıda özetlenmiştir:

Konvansiyonel termal sistem tasarımı ve ısıl veriminin modellenmesi üzerine yapılan yayınlar birleşik güneş pili - ısıl toplayıcı tasarımı üzerine yapılan yayınlara oranla çoktur. Isıl toplayıcı ile ilgili en çok bilinen modelleme yöntemi 1958’de ortaya atılan Hottel-Whillier modelidir. Daha sonraları termal toplayıcıların dinamik modellenmesi ilgi çektiğinden bunun üzerinde çalışılmıştır.

Florschuetz (1979), PV/T sistemlerin analizi için Hottel-Whillier modelinin genişletilmiş bir şeklini öngörmüş ve Raghuraman (1981), sıvı ve havalı PV/T düzlemsel toplayıcıların performansını tahminleyen nümerik yöntemler sunmuştur. Lalovic (1986), düşük maliyetli saydam tip a-Si hücreyi hibrit sistemler için bir gelişme olarak önermiştir. Ancak bugüne değin henüz PV/T verim hesaplamaları için oluşturulan çeşitli modellerin sistematik bir karşılaştırması yapılmamıştır. Önceki çalışmalarda hibrit PV/T sistemlerin tasarım

parametreleri üzerine daha fazla bilgi edinmek için birkaç model oluşturulmuş ve deneysel sonuçlarla yetinilmiştir.

Bergene and Lovvik (1995) bir PV/T kollektörden teorik olarak elde edilebilecek toplam verimin %60–80 arasında olduğunu belirtmiştir. Daha yeni test sonuçları (Fujisawa and Tani, 1997) bir PV/T kollektörden elde edilebilecek ısı veriminin %60 civarında olduğunu ortaya koymuştur. Ancak, ısı verimi için anılan sonuçlar sabit ve düşük giriş sıcaklığındaki akış koşullarında hesaplanan ya da ölçülen anlık verime ilişkindir. Eğer bir su tankı eklenerek PV/T sistem su ısıtmak için kapalı bir sistemde kullanılırsa, gün boyunca giriş sıcaklığı değişeceğinden ısı veriminin günlük test sonuçlarına göre belirlenmesi gerekecektir. Tek ve çift cam örtülü PV/T hava ısıtma sistemlerinin ele alındığı çalışmaların kararlı durum simülasyon sonuçları Garg and Adhikari'nin (1997) çalışmalarında verilmiştir. Bu çalışma sonucunda, kolektör uzunluğu, kütleli debi ve pil yoğunluğunun artması ile sistem veriminin arttığı; boşluk derinliğinin artması ile ise sistem veriminin azaldığı ortaya konmuştur.

Toplayıcının tamamının tasarımını optimize etmek için olduğu kadar toplayıcı bileşenlerindeki küçük iyileşmelerin de yapıldığı doğru bir nümerik model gereklidir. Türkiye'de hibrit PV/T sistem ile ilgili bir çalışmada, ısı taşıyıcı akışkan olarak suyun kullanıldığı termal toplayıcı ile güneş pili arasındaki açıklık mesafesi değiştirilmiş, aynı zamanda hava dolaşımı ile de hücre sıcaklığı düşürülmüştür. Bunun sonucu olarak güneş pilinin veriminde artış olduğu gözlenmiştir ve hibrit PV/T sistemin toplam veriminin yaklaşık %20 olduğu saptanmıştır (Erkaya ve Çolak, 1998).

Krauter et al. (1999), PV/T sistemlerin binaların termal olarak yalıtılmış cephelerine giydirmeye cepheleri ile entegre edilmesini incelemişlerdir. Ölçümlerini, PV panellerin olduğu cepheye termal yalıtım katmanının entegre edilmesi ve aktif havalandırma veya sulu soğutma ile soğutulması üzerine yapmışlardır. İrdeleme sonucu, su soğutmalı PV/T sistemde PV hücrelerdeki sıcaklık düşüşünün dolayısıyla elektriksel verimdeki artışın en fazla olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada ayrıca, ısı verimleri sıvı-soğutmalı PV-modül için %70 ve hava soğutmalı PV-modül için %60'lara çıkarmayı amaçlayan birkaç seçenek denenmiştir.

Florides et al. (2001), cam örtü kullanılmamış PV/T sistemin performansını Kıbrıs'ın iklim koşulları için incelemiştir. PV güneş sisteminin yıllık veriminde

%49'a ulaşan termal verimle, %2,8'den %7,7'ye artış gözlemlenmiştir. PV/T kollektörler elektrik enerjisi üretir ve aynı zamanda sıcak su sağlar. Dolayısıyla toplam verim artar. Bugüne değin yapılan çoğu teorik ve deneysel çalışmalarda ısıl verim için elde edilen sonuçlar, sabit ve düşük giriş sıcaklıklarındaki akış koşullarında hesaplanan ya da ölçülen anlık verimlerdir.

Huang et al. (2001) PV/T sisteme bir su tankı ekleyerek su ısıtmak amacıyla kullanmak suretiyle, gün boyunca değişen giriş sıcaklıklarını ölçmüşler ve sistemin ısıl verimini, elde ettikleri günlük ölçüm sonuçlarına göre hesaplamışlardır. Ayrıca PV/T sistemde elektrik üretiminin yanında su ısıtma için entegre bir tasarım modeli geliştirmişlerdir. İyi bir kalite kontrol ve yığınsal (seri) üretimle maliyetin azaltılması sağlanarak, PV/T sistemler fabrikasyon olarak üretilebileceği düşünülmektedir. Geliştirilen bu sistemin konvansiyonel güneşli su ısıtma sistemlerinin aksine su bağlantılarının yapılması dışında yerinde montaja gereksinim duymadığından montaj giderleri yok denecek kadar azdır. Bunun yanı sıra PV/T ile kurulum için gerekli alan azaldığı gibi PV ve termal toplayıcı birimlerinin tek bir kasada birleşik olmasından dolayı üretim gideri de düşmektedir. Huang et al. (2001) tasarladıkları PV/T sistemlerde günlük verim test sonuçlarını kullanarak termal toplayıcılı su ısıtma sisteminin ısıl verimini ölçmüşlerdir. Bir PV/T sistemin tamamının değerlendirilmesi birincil-enerji tasarrufu modeli kullanılarak yapılmıştır. Pek çok araştırmacı gibi Huang et al. (2001) da PV/T sistemleri değerlendirmek için Eşitlik 2.1'deki toplam verim  $\eta_T$  formülünü kullanmışlardır.

$$\eta_T = \eta_{th} + \eta \quad (2.1)$$

Bu sistemde elektrik enerjisi, ışınım enerjisinden dönüştürülen bir enerji formudur. Dolayısıyla, birincil enerji tasarrufu açısından bir PV/T sistemin enerjisini değerlendirebilmek için, enerji tasarrufu verimi olarak adlandırdıkları aşağıdaki tanıımı yapmışlardır.

$$E_T = \frac{\eta}{\eta_{power}} + \eta_{th} \quad (2.2)$$

PV'nin elektrik güç üretim verimi;  $\eta_{power}$  konvansiyonel bir elektrik güç üretim santrali için elektrik güç üretim verimi;  $\eta_{th}$  PV/T sistemin ısı toplama

verimidir. Bu çalışmada  $\eta_{\text{power}}$  0,38 olarak alınmıştır. Kolaylık olması bakımından konvansiyonel ısıtma sistemlerinin verimini %100 olarak almışlardır.

Tripanagnostopoulos et al. (2002), tarafından hibrit PV/T sistemler üzerine yapılan çalışma, ticari pc-Si PV modüllerin ve soğutma akışkanı olarak suyun (model pc-PV/SU) kullanıldığı bir model üzerine kurulmuştur. Aynı zamanda daha düşük elektriksel verime sahip a-Si PV modül tipi hibrit sistemler de kullanılmıştır. pc-Si ve a-Si tipi PV modüllerden ısının uzaklaştırılması için havanın kullanıldığı hibrit sistemler (sırasıyla pc-PV/HAVA ve a-PV/HAVA modelleri) kurulup denenmiştir. Toplam enerji çıkışını artırmak amacıyla, pc-Si modül tipi temel hibrit sistemler (PV/SU ve PV/HAVA), bu sistemlerle ek cam örtüler (PV/SU+GL ve PV/HAVA+GL), yardımcı yayıncı yansıtıcılar (PV/SU+REF ve PV/HAVA+REF) ve ikisinin birlikte kullanıldığı sistemler (PV/SU+GL+REF ve PV/HAVA+GL+REF) üzerinde çalışmışlardır. Sistemlerin sıcaklık ve verim artışlarını karşılaştırmak için her iki yüzeyi dış ortama açık pc-Si PV modülü (PV/FREE) ve PV yüzeyinin arkasında ısı yalıtımının yapıldığı (PV/INSUL) ikinci bir PV modül de kullanılmıştır. Araştırmacılar tarafından yapılan deneysel çalışmanın ilk adımında ısı taşıyıcı akışkan olarak su (pc-PV/SU, a-PV/SU) ve havanın (pc-PV/HAVA, a-PV/HAVA) fotovoltaik modül olarak a-Si ve pc-Si PV'nin kullanıldığı hibrit PV/T sistemlerinin kararlı durum testleri yapılmış ve pc-Si modülün daha verimli olduğu sonucuna varılmıştır. Cam örtü eklenmesi PV/T sistemin ısı verimini artırmış, yardımcı yayıncı yansıtıcılar kullanılması ise daha yüksek elektriksel verim ve ortalama düzeyde bir ısı verim elde edilmesini sağlamıştır. Cam örtü ve yardımcı yayıncı yansıtıcıların her ikisinin birden kullanımı ile ısı verimi artırırken, sistemin elektriksel verimi yaklaşık aynı düzeyde kalmıştır. Soğutma akışkanı olarak suyun kullanıldığı PV/SU sisteminde elektriksel verimin PV/INSUL'den %13,3 bulunmuş ve PV/FREE'den %3,2 daha fazla olduğu görülmüştür.

Zondag et al. (2002), çalışma sıcaklığını elde etmek için ısındığı süre boyunca toplayıcının verimini düşürerek bir depolama etkisi ve değişen hava koşullarına bağlı bir geçici etki tanımladılar. Oluşturulan 3 boyutlu dinamik modelin dinamik performansını Ekim ayı dış ortam koşullarında gün boyunca PV/T sistemin çıkışını simüle ederek modellemişlerdir. Ölçülen ve hesaplanan akışkan çıkış sıcaklıklarının birbirine yakınlığı modelin güvenilirliğini göstermiştir. 1 adet 3 boyutlu dinamik model ve 3 adet 3 boyutlu, 2 boyutlu ve 1 boyutlu kararlı hal modeli oluşturmuşlardır. Bütün modellerden alınan sonuçlar, deney sonuçlarına %5 doğrulukla yakındır. Günlük bazda dikkate alındığında 1

boyutlu modelin sonuçlarının en az 3 boyutlu dinamik model kadar doğru sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir. Diğer yanda, 2 ve 3 boyutlu modellerin, diğer konfigürasyonlara daha kolay uygulanabildiği ve kolektör optimizasyonunda daha detaylı bilgi verdiği sonucuna ulaşmışlardır.

Sandnes and Rekstad (2002) tarafından yapılan bir çalışmada birleşik bir güneş pili / termal toplayıcı (PV/T), tek-kristal silisyum hücrelerin siyah plastik ısı soğurucu yüzeyin üzerine yapıştırılmasıyla oluşturulmuştur. Güneş pili ve plastik soğurucu yüzeyin ısıl genleşme katsayıları arasındaki farkı yok edecek esnek bir silikon yapıştırıcı kullanılmıştır ve kabul edilebilir bir ısıl temas sağlamak için ince bir tabaka (~0,5 mm) halinde sürülmüştür. Her biri  $1,5 W_p$  olan otuz adet PV hücre, beşer hücreden altı sıra şeklinde dizilmiştir ve toplam PV birim alanı  $0,32m^2$ 'dir. Soğurucu yüzey sıcaklığı akış yönünde artmıştır. Bu sistemde akışkanın akış önü yukarıdan aşağıya doğrudur. Dolayısıyla, ölçülen en yüksek kısa devre akımına,  $I_{sc}$ , sahip hücreler panelin üst kısmına yerleştirilmiş ve onu, aşağıya doğru, azalan kısa devre akımına sahip hücreler izlemiştir. Artan sıcaklık, hücrelerden alınan çıkış akımının artmasına neden olduğundan, bu yerleştirme, hücreler seri bağlandığında toplam verimin artmasına neden olmaktadır. PV/T sistemde kullanılan termal toplayıcı, modifiye polyphenylenoxid (PPO) plastikten yapılmış soğurucu yüzeyin içinde seramik tozlarıyla doldurulmuş kare şeklinde duvara temas eden iç kanallar soğurucu yüzeyin arka tarafının tamamını kaplayarak homojen bir sıcaklık dağılımı sağlar. Isı taşıyıcı akışkan (su), toplayıcının bir iç dağıtım kanalına doğru pompalanmakta ve yerçekimi ile paralel soğurucu kanallardan aşağıya doğru akmaktadır. Suyun seramik parçacıklar arasındaki boş hacmi doldurup üstteki soğurucu tabaka ile temas ettirilerek, soğurucu yüzeyden ısı taşıyıcı akışkana doğru iyi bir ısı taşınımının sağlanması amaçlanmıştır. Bu özel tasarım deney düzeneğinde ölçülen parametreler güneş ışınımı, depo sıcaklığı, ortam sıcaklığı, PV hücre sıcaklıkları ve soğurucu yüzey sıcaklığıdır. PV/T sistemin ısıl verimi,  $\eta_T$ , sistemin enerji dengesi analizi yapılarak hesaplanmıştır. Fotovoltaik enerji dönüşümü verimi( $\eta_{PV}$ ), farklı sıcaklıklardaki ışınım ve hücre sıcaklık değerleri kaydedilerek ölçülen akım-gerilim (I-V) karakteristiğinden elde edilmiştir. PV hücreler AÇ/KAPA kipinde çalıştırılarak termal sistemin verim eğrisi elde edilmiştir. PV modülden elektriksel gücün çekilmesi termal toplayıcı için güneş enerjisi girişini ve dolayısıyla ısıl verimi yaklaşık %10 oranında azaltmıştır. Bir PV/T sistem, siyah soğurucu yüzeyli termal sistem ile karşılaştırılmış ve PV/T sistemin ısıl veriminde aşağıdaki nedenlerden dolayı azalma olduğu gözlemlenmiştir:

1. Gelen güneş ışınımının bir kısmının PV hücreler ile elektrik enerjisine dönüştürülmesinden dolayı termal sisteme gelen güneş ışınımı azalmıştır.
2. Siyah soğurucu yüzeye oranla fotovoltaik hücreler daha düşük optik yutma kapasitesine sahiptir.
3. Hücre/ soğurucu yüzey ara yüzünde oluşan ısıl iletim direnci artmıştır.

Diğer taraftan güneş pilleri seçici yüzeyler olarak davrandığı için PV/T sistemler kolektörden olan ısı kayıplarını azaltmaktadır. Cam örtülü PV/T sistemde ( $PV/T_g$ ) ise kullanılan ek bir cam örtü bu ısı kayıplarını daha da azaltmakta, buna karşın yansıma kayıplarını artırmaktadır. Güneş pilini soğutmak amacıyla kollektör düşük sıcaklıkta çalıştırılmış, bu da PV elektriksel verimi artırmıştır. Güneş pili sıcaklığı, sistem sıcaklığı (giriş suyu sıcaklığı) ve toplayıcı ısı taşınım karakteristiği ile doğrudan ilişkilidir. Birleşik PV/T sistem gerekli soğutma etkisini yaratmak için yeterince düşük sıcaklıklarda çalıştırılmalıdır. PV/T sistem için geliştirilmiş analitik model ile elde edilen simülasyon sonuçlarına göre, hücrelerin soğutulması durumunda, soğutulmamaya göre fotovoltaik güç çıkışında simülasyonun yapıldığı günün sonunda 8,9 Wh'lik net bir kazanç elde edilmiştir. Bu da, soğutma yapılmadığı duruma oranla PV enerji çıkışında %8,8'lik bir kazanca karşılık gelmektedir.

Zakharchenko et al. (2004), panel ve kolektör arasında uygun termal temasın bulunduğu, cam örtü kullanılmamış PV/T sistemi incelemiştir. Sonuç olarak, PV/T sistemdeki PV panel ve kolektörün alanlarının yüksek verimlilik için eşit olmasının gerekmediğini ortaya koymuştur.

Infield et al. (2004), havalandırmalı PV cephelerin termal performans tahminlemesi için farklı yaklaşımlar önermişlerdir. Işınım ve sıcaklık bileşenleri cinsinden havalandırma kazançları ve emisyon kayıplarını tanımlamışlardır. Cephedeki ısı transferini sabit rejimde uygulamışlardır. Bu yaklaşım, İspanya'da bir halk kütüphanesinin havalandırmalı PV cephesine uygulanmıştır. Havalandırmalı dikey PV modülü ve çift camlı PV cepheler için ısı kayıp katsayısı (U) ve termal enerji kazanım faktörü (g) hesaplamıştır. Aylık U ve g değerlerini çıkararak farklı iklimler için termal enerji kazançlarını hesaplamışlardır. Havalandırma kazanımları ile ışınım ile olan ısı kayıpları ve cephelerdeki çeşitli ısı iletim yöntemlerini belirlemek için sabit rejim analizleri yapmıştır. Havalandırmalı cephelerde, PV modülün elektriksel veriminin düşük

sıcaklıktan ötürü arttığı gözlemlenmiştir (genellikle 45°C'nin altında). Alternatif olarak daha basit bir yaklaşım, havalandırılmış cepheyi tek bir havalı güneş kolektörü gibi düşünmektir. Güneş kolektörü verimi için kullanılan standart matematiksel ifadeyi, Mataro'nun iklimsel verilerini inceleyerek sınımlamıştır.

Coventry (2005), yoğunlaştırılmış PV/T güneş kolektörünün performansına ilişkin yaptığı çalışmada PV/T sistemin yaklaşık termal veriminin %58, elektriksel veriminin %11 olduğunu saptamıştır. Bu ise sistemin toplam veriminin %69 olduğu anlamına gelmektedir.

Rosell et al. (2005), 2 eksenli ve 11 kat yoğunlaştırma verimi olan PV/T sistemde deneysel olarak çalışmıştır. Ölçülen değerlerden, sistemin performansının %60'ın üzerinde olduğunu saptamıştır. Othman (2005), çift geçişli ve CPC (Compound Parabolic Collector)'li PV/T sistemin prototipini tasarlayıp üretmiştir. Bulgular, PV/T hibrit modülün elektrik üretiminin hava akışının artan sıcaklığı ile düştüğünü ortaya koymaktadır.

He et al. (2006), PV/T hibrit kolektörlerde ısınan güneş pili hücrelerini soğutmak için akışkan olarak su kullanmışlardır. Su kullanarak güneş pili hücrelerinin soğutulması sistemin enerji performansını ve pilin verimini arttırmıştır.

Tiwari and Sodha (2006), binaya entegre PV/T sistemde (BEPV/T) PV modül ve su sıcaklıkları için analitik bir ifade üretmişlerdir. BEPV/T sistemin deneysel uygulamasında iklimsel veriler ve tasarım parametreleri için nümerik hesaplamalar yapmışlardır. Simülasyon sonuçlarından, günlük termal verimin yaklaşık %58 olduğunu tespit etmişlerdir. Bu değer, Huang et al. (2001)'un yapmış olduğu deneysel çalışma sonucunda elde ettiği %61,3 olan termal verime çok yakın bir değerdir.

Yun et al. (2007), bina cephesine entegre edilmiş PV sistemin havalandırılmalı halini analiz etmişlerdir. Bu sistemin kışın ön-ısıtma, yazın ise PV modül sıcaklıklarını düşürmek için doğal havalandırma olarak kullanılabileceğini önermişlerdir. Tüm cephe alanına oranla optimum alanı kaplayan saydam cam ve opak PV modül arasındaki ilişkiyi ve enerji performansına etki eden değişkenleri incelemişlerdir. Tasarım parametrelerini, iklim, bina karakteristikleri, cephe biçimleri ve PV sistem elemanlarına göre sınıflandırmışlardır. Bu araştırmanın sonucu olarak, BEPV sistem cephesi için PV cephenin verimlilik indeksi (BVEF)

kavramını tanımlamışlardır. Bu indeksi, PV cephenin genel enerji performansını belirlemek için geliştirmişlerdir. Bu performans, fosil yakıt kullanılarak gerçekleştirilen yapay aydınlatma yerine, yararlı gün ışığı oranına, PV modülün ürettiği elektrik enerjisine ve binanın ısıtma ve soğutması için harcanan enerji tüketimine bağlıdır. Sonuç olarak, bina cephesine entegre edilmiş PV sistemin havalandırma performansına etki eden elektrik üretimi ve diğer faktörleri tespit etmişlerdir.

Jie et al. (2007a), PV/T duvar modelini DC fan'ın olması ve olmaması durumları için teorik simülasyonlar yaparak incelemişlerdir. Modeli doğrulamak adına bu iki koşul için alan testleri yapmışlar ve simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırma sonucunda birbirine çok yakın değerler bulmuşlardır.

Jie et al. (2007b), bir odanın cephesine PV Trombe duvarlı sistem inşa etmişlerdir. Geliştirilmiş matematiksel modele dayanarak sistemin teorik simülasyonunu yapmışlardır. Modelin doğruluğunu test etmek için alan testi yapmış, simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçları karşılaştırmış ve oldukça yakın sonuçlar olduğunu tespit etmişlerdir. Sonuç olarak, PV/T duvarın DC fan kullanılması sonucu ortalama elektriksel veriminin %10-11'e kadar çıktığını tespit etmişlerdir. Saat 07.00- 17.00 arasında ortalama PV hücre sıcaklıklarının  $1,28^{\circ}\text{C}$  azaldığını ve ortalama iç ortam sıcaklığının  $0,50^{\circ}\text{C}$  arttığını gözlemlemişlerdir. DC fan kullanılmasının, iç ortam sıcaklığını ve PV hücrelerin soğumasıyla elektriksel verimin artırılmasını sağladığını tespit etmişlerdir. Test sonuçlarına dayanarak iç ortam sıcaklığında dikkate değer bir artış olduğunu tespit etmişlerdir. PV Trombe duvarlı sistemdeki günlük ortalama elektriksel verimin deneysel olarak %10,4'e kadar çıktığını gözlemlemişlerdir.

Fung and Yang (2008), bina cephesine entegre edilen yarı-geçirgen PV modül için tek boyutlu ısı transfer modeli geliştirmişlerdir. PV modül için farklı parametrelerin etkilerini araştırmışlar ve toplam ısı kazancı için en önemli bileşenin güneş enerjisi kazancı olduğunu ortaya koymuşlardır.

Jianga et al. (2008), Hefei'nin iklim verilerine dayanarak PV/T duvarlı sistem için bir simülasyon modeli geliştirmişlerdir. Simülasyon sonuçlarına göre, kaplama alanı arttıkça, elektrik üretimi ve PV/T duvarın toplam veriminin arttığını fakat iç ortam sıcaklığı ve PV/T duvarın termal veriminin azaldığını tespit

etmişlerdir. Sonuç olarak, PV hücrelerin daha büyük alan kaplamasının daha iyi termal verim getirmediği sonucuna varmışlardır.

Wong et al. (2008), yarı-geçirgen PV'lerin konutlarda tepe ışığı uygulamalarında kullanılmasını incelemiştir. Alan ölçümleri sonuçlarını kullanarak yarı-geçirgen PV panellerin güç üretimi, termal ve optik karakteristiklerinin anlaşılmasını sağlamışlardır. Bu karakteristikleri ortaya koyan hesap modelleri geliştirmişler ve bu modellerin doğruluğunu sınamışlardır. Japonya'daki 5 iklim bölgesi için Energy Plus programını kullanarak bu modellerin enerji tüketim analizlerini yapmışlardır. Gerekli optimizasyon ölçümleri sonucunda, ışınım geçirgenlik oranı %50 olan yarı-geçirgen PV çatı ışıklığında, standart BEPV çatı uygulamasına kıyasla ısıtma ve soğutma yüklerinde en fazla %5,3'lük bir azalma olduğunu saptamışlardır. Toplam enerji tüketimi düşünüldüğünde ışınım geçirgenliği %50 olan yarı-geçirgen PV çatı ışıklığında net enerji kazanımının %3- 8,7 arasında değişmekte olduğunu bulmuşlardır.

Bloem (2008), bina cephesine kaplama olarak eklenen PV sistemlerin elektriksel ve termal performans değerlendirmesini deneysel verilere dayanarak analiz etmiştir. PV modülün tasarımı, elektriksel ve termal enerji akış analizleri yapılmasını sağlamıştır. PV modül için farklı materyaller kullanmış ve kaplamaların tasarımının elektriksel performansa etkisini incelemiştir. Sonuç olarak bu çalışmada, cam-cam PV modül tipi için zorlanmış ventilasyon sonuçlarını değerlendirmiştir.

Agrawal and Tiwari (2009), birim alandan daha fazla elektrik enerjisi elde etmek ve mekân ısıtması için gerekli termal enerjiyi üretmek için bir binanın çatısına binaya entegre PV/T (BEPV/T) sistem uygulaması yapmışlardır. Basit enerji denklemleri ile 1 boyutlu dinamik analiz modeli geliştirmişlerdir. Bu model baz alınarak yapılan analiz ile Hindistan'daki soğuk iklim koşulları için en uygun BEPV/T sistemin seçimi yapılmıştır. PV performansları, net enerji kazanımı ve binanın ekserjisi hesaplanmış ve sonuç olarak, havanın sabit bir kütle akış oranı için, sistemin seri olarak bağlanmasının; sabit bir hava akış hızı olması durumunda ise sistemin paralel bağlanmasının daha iyi performans verdiği ortaya konulmuştur.

Cheng et al. (2009), PVSYST yazılımını kullanarak BEPV/T sistem için en uygun açı ile sistemin kurulu olduğu arazinin enleminin derece cinsinden değeri

arasında bir korelasyon kurmuşlardır. Sonuç olarak, kuzey yarıkürede maksimum ışınım alabilmek için sistem, güneye yönlendirilmiş olmalı ve sistemin yatay düzlemle yaptığı açının, sistemin bulunduğu arazinin enlemine eşit olması gerektiğini belirtmişlerdir.

Chow et al. (2009), bina cephesine entegre edilmiş fotovoltaik su ısıtma sistemi için enerji modeli oluşturarak bir bilgisayar simülasyonu geliştirmişlerdir. Sonuç olarak, PV su ısıtma sisteminin ticari PV uygulamalarına kıyasla ekonomik olarak çok daha avantajlı olduğunu ortaya koymuşlardır. 1 yıllık süre için sistemin termal ve elektriksel verimlerini sırası ile ortalama %37,5 ve %9,39 bulmuşlardır.

Anderson et al. (2009), binalarda duvarlar ve çatı strüktürü için BEPV/T güneş kolektörü geliştirmiş ve sistemin teorik analizini Hottel-Whillier Modeli'ni kullanarak yapmışlardır. Ayrıca teorik sonuçları prototip kolektörün deneysel verileri ile doğrulamışlardır.

Trinuruk et al. (2009), Tayland'ın tropik iklim koşullarında, BEPV uygulaması için 2 tahminleme modeli incelemişlerdir. Bu modeller Normal İşletim Hücre Sıcaklığı Modeli (NOCT) ve Sandia Ulusal Laboratuar Sıcaklık Tahminleme Modeli'dir (SNL). Sonuç olarak, SNL Modeli'nin, NOCT Modeli'ne kıyasla çok daha iyi sıcaklık tahminlemesi yapılmasını sağladığını tespit etmişlerdir.

Rüther and Brown (2009), güneşli ve ılık iklim bölgelerindeki havaalanı binalarının enerji ihtiyaçlarının güneş ışınımı potansiyeli ile karşılanması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu binaların geniş ve yatay, izole ve gölgelenmeyen olduklarından PV sistem entegrasyonu için büyük bir potansiyele sahip olduklarını ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada, Brezilya'da (27°C, 48°B), Florianopolis Uluslararası Havaalanı binasına BEPV sistem entegrasyonu durumunda enerji ihtiyacındaki azalmanın potansiyel etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak, ılıman iklim bölgelerindeki havaalanı binalarına PV sistem entegrasyonu durumunda, havaalanı kompleksinin bütün elektrik güç tüketiminin karşılanabileceğini ortaya koymuşlardır. Bu durum, sıfır enerjili bina konsepti olarak tanımlanmaktadır ve önemlidir.

Park et al. (2009), binada saydam eleman olarak kullanılan yarı-geçirgen PV modülün elektriksel ve termal performansını incelemişler ve PV modülün termal karakteristiklerinin elektrik üretimi performansına etkisini değerlendirmişlerdir.

Deneyleri, hem Standart Test Koşulları'nda hem de dış ortam koşullarında yapmışlardır. Sonuç olarak gücün, Standart Test Koşulları'nda %0,48 oranında düştüğünü, dış ortam koşullarında ise PV modül sıcaklığının 1°C'lik artışına karşılık %0,52 oranında düştüğünü tespit etmişlerdir. Aynı zamanda, modülde kullanılan camın özelliklerinin PV modül sıcaklığını, dolayısı ile elektriksel performansı etkilediğini ortaya koymuşlardır.

Joshi et al. (2009), hibrit PVT havalı kolektör sisteminin termal performans değerlendirmesini yapmışlardır. Bunun için 2 çeşit PV modülün, cam-cam ve cam-tedlar tipi modüllerin, performanslarını New Delhi'nin iklimsel özelliklerini kullanarak kıyaslamışlardır. Sonuç olarak, cam-cam tipi PV modülün hibrit havalı kolektörde kullanılması durumunda termal verim açısından daha iyi performans verdiğini gözlemlemişlerdir.

Dubey et al. (2009), iklim ve tasarım parametrelerinin bir fonksiyonu olarak PV modülde akış olması ve olmaması durumundaki elektriksel verim için analitik bir ifade geliştirmişlerdir. Deneysel çalışmada New Delhi'nin iklim koşulları için 4 farklı PV modül konfigürasyonu kullanmışlardır. Sonuç olarak, kanallı cam-cam PV modül tipinde elektriksel verimin en yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Cam-cam PV modül tipinin kanallı ve kanalsız olması durumundaki yıllık elektriksel verimlerinin sırası ile %10,41 ve %9,75 olduğunu bulmuşlardır.

Yukarıdaki çalışmalarda, PV/T sistemler ile ilgili yapılan çalışmalar benzer nitelikler taşımaktadır. Burada önerilen sistemde, bina cephesine entegre edilecek saydam PV panellerin Trombe duvarlı sistem ile birlikte davranışı literatür özetinden de anlaşılacağı gibi daha önce irdelenmemiştir. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında önerilen sistemde önceki çalışmalardan farklı olarak, güneşten ısı ve elektriksel anlamda aynı cephe ve aynı yüzey alanından yararlanılması durumu deneysel ve teorik olarak araştırılmakta ve sistem için bilgisayar ortamında özgün bir model geliştirilmektedir. Sonuç olarak, bina cephelerinde aynı yüzey alanını kullanmak suretiyle hem elektrik üretimi hem de kış koşullarında ısıtma amaçlı enerji tasarrufu sağlanması olanakları araştırılacak ve modellenecektir.



### 3. FOTOVOLTAİK/TERMAL (PV/T) SİSTEMLER

Güneş enerjisi 2 ayrı şekilde kullanılmaktadır: Gelen güneş ışınımının ısıya çevrildiği termal güneş sistemleri ve güneş enerjisinin elektrik enerjisine çevrildiği fotovoltaik (PV) sistemlerdir. Termal güneş sistemleri su ısıtması, mekân ısıtması ve güç üretimi gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Fotovoltaik sistemler ise saatler, hesap makineleri ve Sydney Olimpiyat Köyü'ndeki uygulama gibi büyük güç sistemlerinde elektrik üretim uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu 2 sistemin bir arada kullanıldığı hibrit sistemlere fotovoltaik/termal (PV/T) sistemler denilmektedir. Bu sistemlerde amaç, tek bir sistemden hem ısı hem de elektrik enerjisi eldesi sağlamaktır.

Fotovoltaik/Termal Sistemler (PV/T): Fotovoltaik/Termal (PV/T) Güneş Kolektörleri ve Binaya Entegre Fotovoltaik/Termal Sistemler (BEPV/T) olmak üzere 2'ye ayrılmaktadır.

#### 3.1 Fotovoltaik/Termal (PV/T) Kolektörler

1970'lerin sonunda, PV ve termal güneş sistemlerini tek bir cihazda birleştiren çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Bu sistemler Fotovoltaik/Termal (PV/T) güneş kolektörleri olarak adlandırılmıştır.

PV/T sistemlerin avantajları:

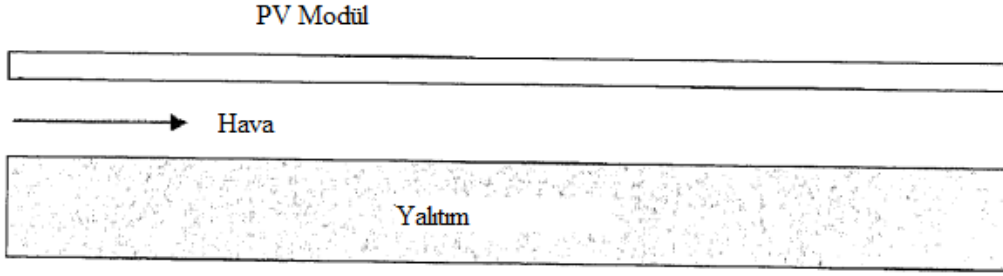
- Termal güneş sistemleri kullanılarak soğutulması sonucu PV hücrelerin elektriksel veriminin artırılması sağlanmakta,
- 2 sistemin tek 1 cihazda uygulanması ile güneş enerjisi uygulaması için kullanılacak cihazın kaplayacağı alan azaltılmaktadır.

Bilindiği gibi mono ve polikristal silikon hücrelerinin yüzey sıcaklığının 1°C artması, verimlerinin %0,5 düşmesine neden olmaktadır. PV/T sistemlerde PV yüzeyin soğutulması, PV hücre sıcaklıklarının azalmasını, bu da sistemin elektriksel veriminin artmasını sağlamaktadır.

PV/T Güneş Kolektörleri, PV/T Havalı Kolektörler, PV/T Sulu Kolektörler ve Yoğunlaştırılmalı PV/T Güneş Kolektörleri olmak üzere 3 tiptir.

### 3.1.1 PV/T havalı kolektörler

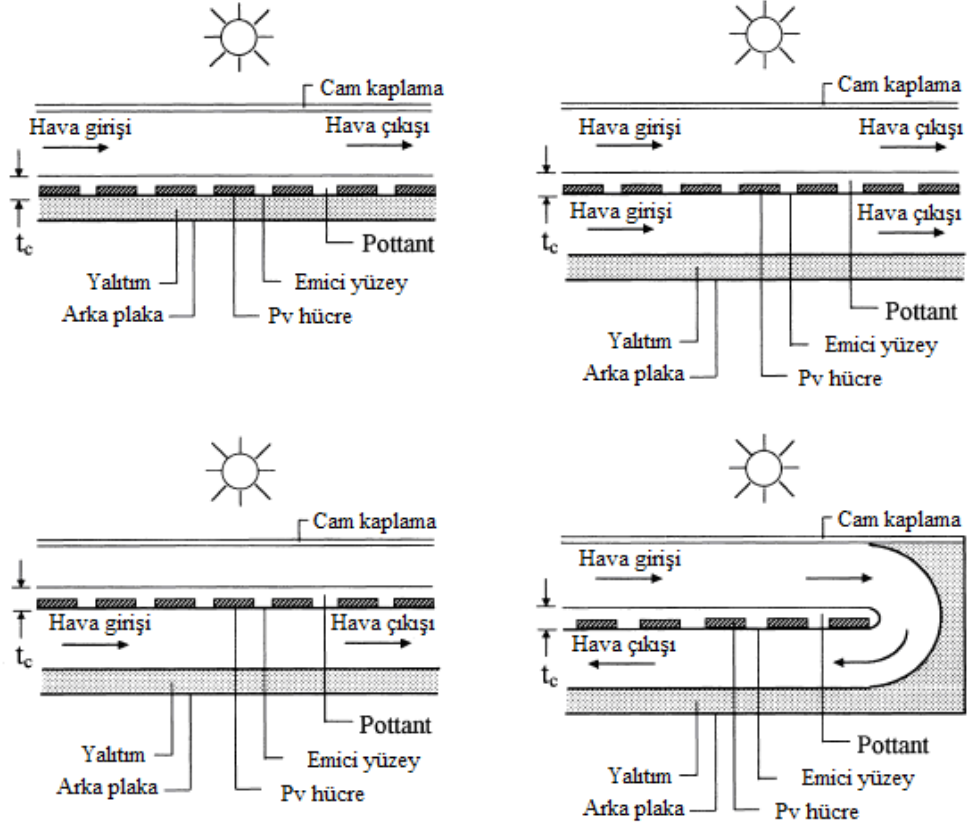
Genel olarak, PV/T kolektörler için en ucuz ve basit olanı hava ısıtım sistemleridir. Bunlarda basit bir şekilde, PV modülün arkasındaki boşlukta yer alan hava devrettirilmektedir. Bu hava devinimi, paneli soğuturken arkasındaki havayı da ısıtmaktadır. Bu sistem, basit olarak Şekil 3.1’de görülmektedir (Anderson et al., 2008).



Şekil 3.1 PV/T havalı kolektör modeli.

Hegazy (2000), nümerik model kullanarak 4 tip PV/T hava ısıtım güneş kolektörünü incelemiştir. Şekil 3.1’de görülen kolektörden farklı olarak sistemde, PV modülün üzerine cam örtü konularak 2. bir hava boşluğu yaratılması sonucu ayrı bir sistem oluşturmuştur. 2. sistem, genelde kolektörlerde su ısıtılması için kullanılan bir sistem olup, kolektörün üst yüzeyinden konveksiyonla olan ısı kayıplarını azaltmak amacıyla tasarlanmıştır.

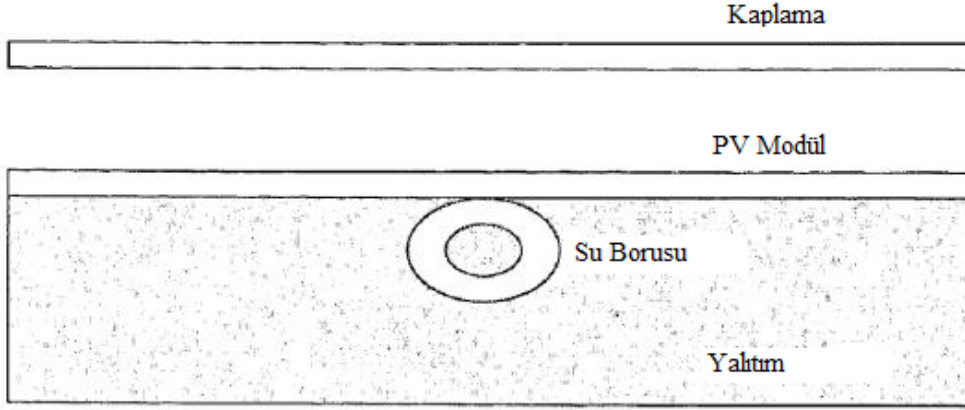
PV/T havalı kolektör, düzlemsel hava ısıtım kolektörlerdeki siyah emici yüzey üzerine PV hücrelerin yapıştırılması ile oluşturulmuştur. Hem düşük derecede termal, hem de yüksek derecede elektriksel enerjilerin aynı üniteneden elde edilmesi gibi bir avantajı beraberinde getirir. Sonuç olarak, iki ayrı ünitenin maliyetinden çok daha ucuz maliyete sahiptir. Düzlemsel hava ısıtım kolektörler, çok çeşitli tasarıma sahiptir. En yaygın olanları, Şekil 3.2’de görülmektedir. Bu tek camlı kolektörlerde hava, emici yüzey üzerinden (Model 1), altından (Model 2), hem üzerinden hem altından (Model 3) ya da çiftli geçiş (Model 4) şeklinde akabilir. (Hegazy, 2000)



Şekil 3.2 PV/T havalı kolektörün farklı uygulama örnekleri (Hegazy, 2000)

### 3.1.2 PV/T sulu kolektörler

PV/T kolektörlerin diğer bir uygulaması da su ısıtmalı sistemleridir. En basit formunda PV/T sulu kolektör Şekil 3.3'te görüldüğü gibi standart bir termal güneş kolektörünün üzerine PV hücrelerin yerleştirilmesi ile oluşturulmuş ve PV modül üzerinde boşluk bırakılarak cam örtü kullanılarak oluşturulmaktadır.



Şekil 3.3 PV/T sulu kolektör modeli.

Bergene and Lovvik (1995), güneş pili hücreleri entegre edilmiş düzlemsel güneş kolektörünün teorik modelini incelemiştir. PV/T sistemin termal ve elektriksel verimini hesaplamak için algoritma geliştirmiştir. Bu tür sistemlerin, evsel sıcak su sistemlerinde ön-ısıtıcı olarak kullanılmasını önermişlerdir.

Kalogirou and Tripanagnostopoulos (2007), PVT sistemin endüstriyel uygulamalarının Akdeniz'de ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu göstermişlerdir. Aynı zamanda, amorf silikon teknolojisi kullanılan PVT sistemlerin daha düşük elektriksel verimleri olmasına karşın daha kısa geri ödeme süresi olduğunu ortaya koymuşlardır.

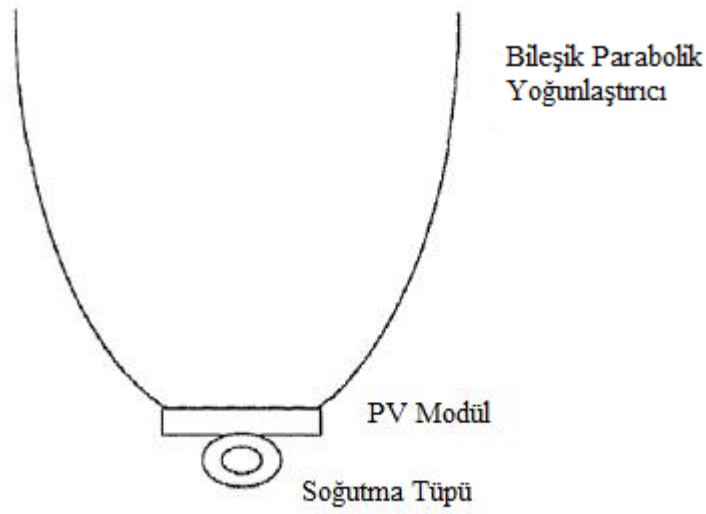
### 3.1.3 Yoğunlaştırılmalı PV/T güneş kolektörleri

Diğer bir PV/T kolektör çeşidi yoğunlaştırılmalı PV/T güneş kolektörleridir. İsminden de anlaşılacağı gibi güneş ışınımının PV/T kolektör üzerinde yoğunlaştırılması (odaklandırılması) prensibi ile çalışmaktadır. Güneş ışınımının yoğunlaştırılması bileşik parabolik yoğunlaştırıcı (CPC), lineer veya dairesel Frensel lensleri, reflektörler veya parabolik yansıtıcılar ile sağlanabilmektedir. Tipik bir yoğunlaştırılmalı PV/T güneş kolektörü Şekil 3.4'te görülmektedir.

Garg and Adhikari (1999), bir sürü kesilmiş bileşik parabolik yoğunlaştırıcının tek bir PV/T modülde kullanılması durumunu incelemiştir. Sonuç olarak, yoğunlaştırma oranı 3 olan hava ısıtması için kullandıkları

kolektörün bir sisteme entegre edilmesi durumunda çok daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır.

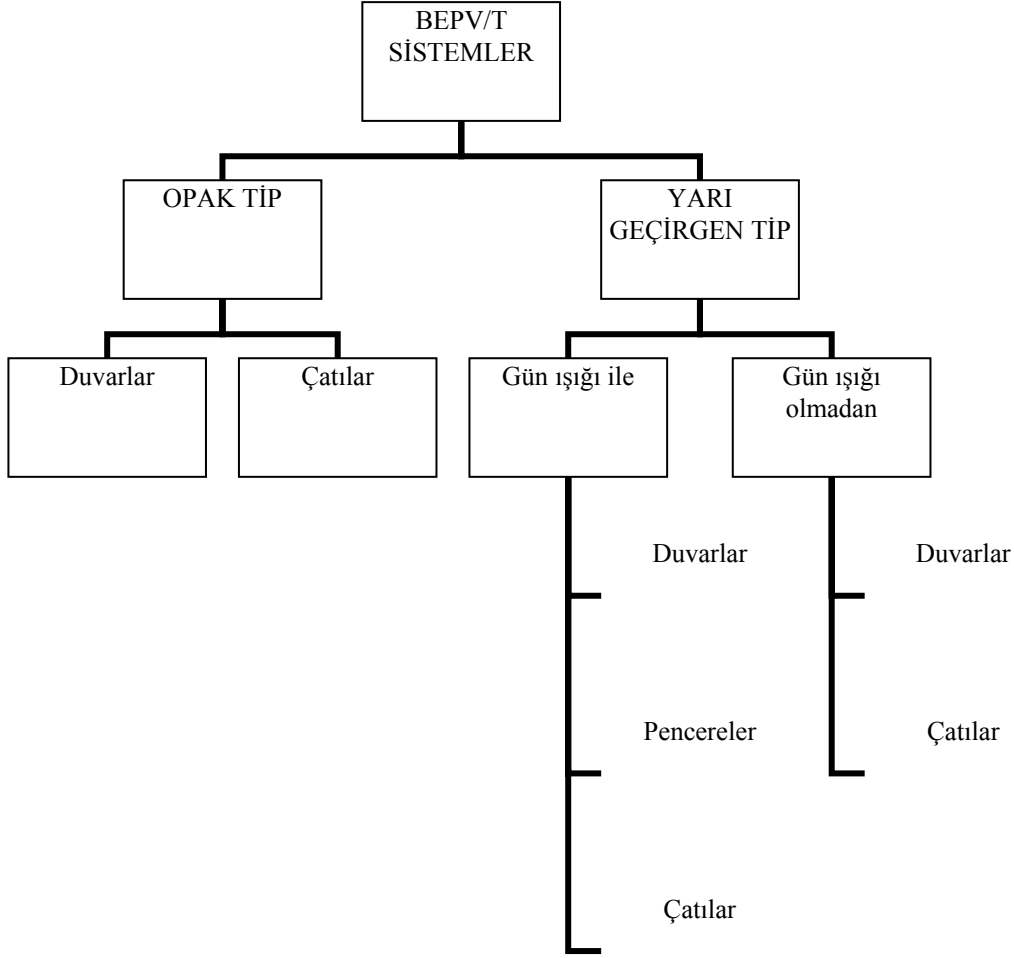
Othman et al. (2005), lineer Frensel reflektörleri kullanarak yoğunlaştırıcı PV/T kolektörü incelemişlerdir. Yoğunlaştırma oranı 11 olan bu kolektörden elektriksel yük olmadan en fazla %60 termal verim elde etmişlerdir. PV/T sistemdeki en büyük termal direncin PV hücreleri ile emici yüzey arasında gerçekleştiğini tespit etmişlerdir.



Şekil 3.4 Yoğunlaştırıcı PV/T güneş kolektörü modeli (Anderson et al., 2008).

### 3.2 Binaya Entegre Fotovoltaik/Termal Sistemler (BEPV/T)

BEPV/T sistemler ya yarı-geçirgen ya da opak tipte olmaktadır. Gün ışığı kullanan yarı-geçirgen tip sistemlerde, binanın duvarları, çatısı ve pencerelerine entegre edilmektedir. Buna rağmen, aydınlatmanın olmadığı yarı-geçirgen tip sistemler ve opak tip sistemler, binaların duvarlar ve çatılarına entegre edilmektedir. Duvarlar ve pencerelere entegre edilen BEPV/T sistemler cephe diye adlandırılmaktadır. BEPV/T sistemlerin detaylandırılmış sınıflandırması Şekil 3.5'te görülmektedir. (Agrawal and Tiwari, 2009)



Şekil 3.5 BEPV/T sistemlerin detaylandırılmış sınıflandırması.

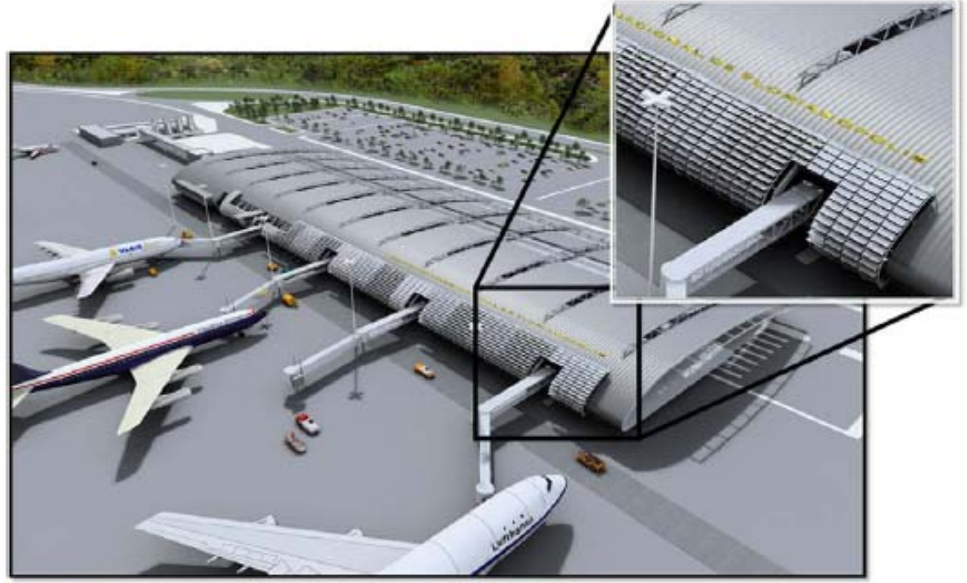
Prensipite havalı BEPV/T sistemler, PV/T havalı kolektörlerle aynı olmasına rağmen, pratikte bir takım farklılıklar vardır. Bunun nedeni, BEPV/T sistemin hacimsel debisinin daha düşük olması ve doğal havalandırma uygulanmasıdır. Sonuç olarak bu tip sistemler, çeşme suyu ısıtması veya havanın bina kabuğunda dolaştırılması için çok uygun değildir. Odanın havasının havalı kolektörde sirküle edilmesi veya doğal konveksiyonun oluşturduğu hava akımının havalandırmaya yardımcı olması için kullanılabilir.

BEPV/T Sistemler ise Çatıya Entegre BEPV/T Sistemler ve Bina Cephesine Entegre BEPV/T Sistemler olmak üzere 2 tiptir. Çatı sistemleri daha yüksek izolasyon sağlamakta, cephe sistemleri ise pahalı cephe kaplama malzemelerinin yerini almaktadır.

### 3.2.1 Çatıya entegre BEPV/T sistemler

Özellikle ılıman iklimlerde, ticari binalardaki elektrik enerjisi tüketiminin en önemli nedeni havalandırma sistemleridir. Ilık ve güneşli bölgelerdeki havaalanı binalarının enerji ihtiyacının tamamı güneş enerjisinden karşılanabilmektedir.

Rüther and Braun (2009), Şekil 3.6’da görülen Brezilya’daki Florianopolis Uluslararası Havaalanı’nın enerji ihtiyacının BEPV/T sistem ile azaltılması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Havaalanının tüm elektrik enerjisi ihtiyacı uygulanan BEPV sistemden karşılanabilmektedir. Bu bina, sıfır enerjili bina tasarımına güzel bir örnektir.



Şekil 3.6 Brezilya’daki Florianopolis Uluslararası Havaalanı.

Çatıya entegre PV/T sistemin dünya üzerindeki ilk büyük ölçekli uygulaması Şekil 3.7’de görülen Beijing Olimpiyat Köyü’ndedir. BEPV/T sistem, merkez binanın çatısına uygulanmış olup, Çin’deki geleneksel bir binadan %75 daha az enerji tüketmektedir. Sistem 10kW’lık PV ve 20kW’lık ısıtma sağlamak için tasarlanmıştır (Renewable Energy World, 2010).



Şekil 3.7 Beijing Olimpiyat Köyü merkez binası BEPV/T sistem çatı uygulaması.

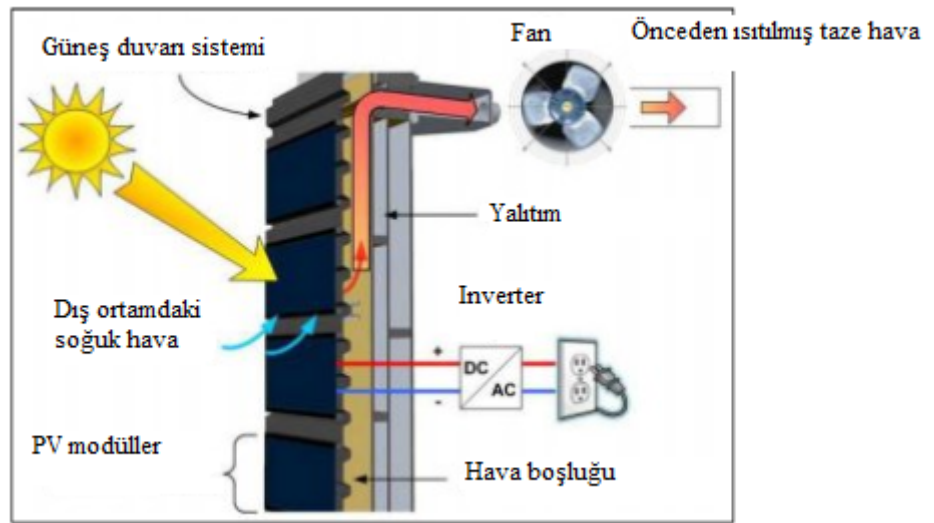
### 3.2.2 Bina cephesine entegre (BEPV/T) sistemler

Binaya entegre diğer bir PV/T sistem örneği Şekil 3.8’de görülen Montreal Kanada’da John Molson School of Business binasının cephesine uygulanmıştır. Bu sistem 100kW’lık bir sistem olup, 25kW elektrik ve 75kW termal ısı üretmektedir. Sistem, bina cephesinde 278m<sup>2</sup>’lik bir alanı kaplamaktadır. Bu özelliklerinden ötürü Dünya’daki en büyük BEPV/T sistem cephe uygulamasıdır. Termal enerji veriminin %60’a kadar çıktığı gözlemlenmiştir. PV panellerin arka yüzeyinde zorlanmış taşınımla hava dolaştırılarak PV veriminin geleneksel sisteme kıyasla %5 oranında arttırıldığı tespit edilmiştir. Sistemde 384 PV modül kullanılmıştır (John Molson School of Business, 2010).



Şekil 3.8 Montreal Kanada’da John Molson School of Business binası BEPV/T sistem cephe uygulaması.

Sistemin çalışma prensibi Şekil 3.9’da görüldüğü gibidir. Bu sistem, PV panellerin arka yüzeyindeki ısıyı alarak PV panellerin soğumasını, dolayısı ile elektriksel verimin artmasını sağlamaktadır. Güneş duvarında ısınan hava, hava boşluğuna alınmakta ve binanın HVAC sistemine iletilmektedir. Önceden ısıtılmış havanın HVAC sisteminde kullanılması, ısıtma ve havalandırma yüklerini azaltmaktadır.



Şekil 3.9 BEPV/T sistemin çalışma prensibi.

Tez çalışması kapsamında geliştirilen BEPV/T sistem modeli için hem deneysel ölçüm çalışmaları hem de HAD analizleri ile teorik hesaplama çalışmaları yapılmıştır. Bir simülasyon modeli geliştirilerek simülasyon sonuçları, ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmış; termal ve elektriksel verimleri belirlenerek sistemin enerji analizleri yapılmıştır. Bu nedenle tezin bir sonraki bölümünde, kullanılan hesap modeli ile sistemin enerji modellenmesi anlatılacaktır.

## 4. BİNAYA ENTEGRE PV/T SİSTEMİN ENERJİ MODELLEMESİ İÇİN BİR YAKLAŞIM

BEPV/T sistem, elektrik üretiminde kullanılan PV modül ile ısı üretiminde kullanılan termal kolektörün birleşik bir sistem olarak kullanılması ile oluşturulan PV/T kolektörün bina strüktürüne entegre edilmesi sonucu ortaya çıkan hibrit bir sistemdir. Bu sistem, yeni inşa edilecek binalara uygulanabileceği gibi mevcut binaların iyileştirilmesinde de kullanılabilirliği açısından önemlidir. Enerjinin giderek pahalandığı ve çevre kirliliğinin birçok türün yok olmasına sebep olduğu günümüzde, temiz ve yenilenebilir kaynaklar arasında birincil öneme sahip güneş enerjisi kullanarak çalışan bu sistemin, ısı ve elektriksel bakımdan ne denli verimli olduğu enerji analizleri sonucu ortaya konulacaktır.

Bu bölümde Binaya Entegre Bir PV/T (BEPV/T) hibrit sistemi oluşturan elemanların özellikleri, neden seçildikleri ve çalışma şekilleri tanıtılacaktır. Aynı zamanda seçilen ve kurulan sistemin performansını belirlemek için geliştirilen deneysel düzenek tanıtılacaktır. Ayrıca, deneysel düzenden elde edilen verilerin teorik analizle kıyaslanabilmesi için kurgulanan kuramsal analiz yöntemi anlatılacaktır.

### 4.1 Deney Düzenegi

Deney düzenegi için Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü'nün zemin katındaki laboratuvarın içine bir test odası inşa edilmiştir. Test odasının güney cephesindeki duvarın (termal kütle) üst ve alt kısımlarında hava transferi için kullanılacak menfez açıklıkları bırakılmıştır. PVC malzemeden oluşan bu menfezler kapatıldığında hava sızdırmazlığı sağlaması bakımından ekstrude polistren ile yalıtılmıştır. Güney duvarının önünde 50cm boşluk bırakılarak yarı-geçirgen güneş pili yerleştirilmiştir. Sistem, Trombe duvarlı güneş duvarının cam olan kısmı yerine güneş pili kullanılması ile oluşturulmuştur.

#### 4.1.1 Yarı-geçirgen Güneş Pilleri

RWE Schott Solar firmasının ürettiği yarı saydam ince-film amorf silisyum güneş pili Şekil 4.1'de görülmektedir. Bu güneş modülünün elektriksel verisi Çizelge 4.1'de verilmiştir (RWE Schott Solar, 2010).

Çizelge 4.1 Güneş modülünün elektriksel verisi.

Nominal Güç	PMPP	27Wp
Maksimum güç noktasındaki gerilim	UMPP	36V
Maksimum güç noktasındaki akım	IMPP	0,75A
Kısa devre akımı	$I_{sc}$	1,02A
Açık devre gerilimi	$U_{oc}$	49V



Şekil 4.1 RWE Schott Solar firmasının yarı saydam ince-film a-Si tandem güneş modülünün görünüşü.

Yukarıdaki elektriksel veri modülün birkaç ay güneş ışığına maruz kaldıktan sonraki kararlı durumu için standart test koşullarında (STC -  $1000W/m^2$ , AM 1.5, hücre sıcaklığı  $25^{\circ}C$ ) elde edilmiştir. Başlangıçta güç çıkışı nominal gücü %18 oranında aşabilir. Verinin toleransı  $\pm\%10$ 'dur.

Güneş modülünün boyutları ve ağırlığı Çizelge 4.2'de, karakteristik verisi Çizelge 4.3'te verilmiştir. Modül 30 adet seri bağlı hücreden oluşmaktadır. Sıcaklık çalışma aralığı  $-40...+85^{\circ}C$ , nominal çalışma sıcaklığı  $NOCT = 49^{\circ}C$ 'tır ve hücre sıcaklık katsayıları Çizelge 4.4'teki gibidir (RWE Schott Solar, 2010).

Çizelge 4.2 Güneş modülünün boyutları ve ağırlığı.

Boyutlar	1000 × 600mm <sup>2</sup>
Modül cam kalınlığı / bağlantı ile	10mm / 22mm
4 taraftaki foto-aktif olmayan bölge genişliği	16mm
Ağırlık	14 kg

Çizelge 4.3 Güneş modülünün karakteristik verisi.

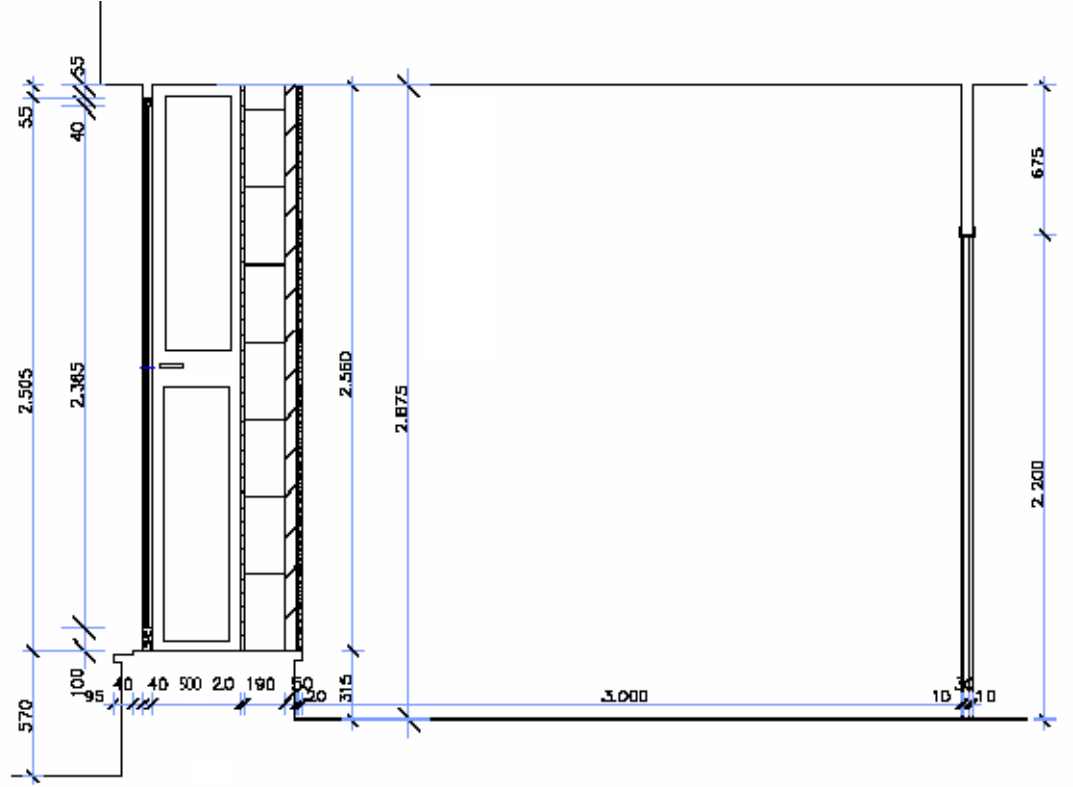
Güneş pili tipi	ASI® tandem hücreler halinde ince-film amorf silisyum
Görünüşü	Uniform olarak koyu kahve
Yarı geçirgenlik	Yaklaşık %10 geçirgenlik, nötr renk
Elektriksel bağlantı	Yalıtımlı kablo, 2,5mm <sup>2</sup> kesit alanı, 100cm uzunluk, MC konnektör

Çizelge 4.4 Güneş modülünün hücre sıcaklık katsayıları.

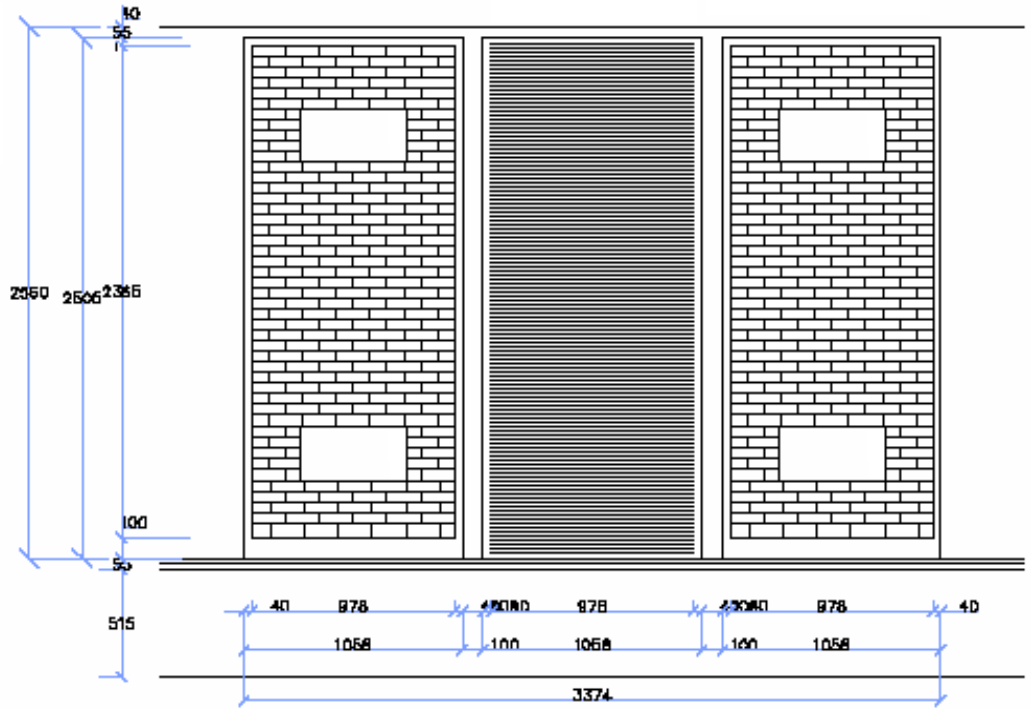
Nominal güç için	TK(P)	- % 0,2/K
Açık devre gerilimi için	TK(U <sub>oc</sub> )	- % 0,33/K
Kısa devre akımı için	TK(I <sub>sc</sub> )	+ % 0,08/K

ASI THRU güneş pili için güç çıkışının sıcaklığa bağımlılığı düşüktür.





Şekil 4.3 Test odasının kesiti.



Şekil 4.4 Test odasının güney cephesinin görünüşü.

Sistemin enerji analizleri, PV/T sisteme ilişkin verimlerin ölçüm ve ANSYS CFX yazılımı ile hesaplanması esasına dayanmaktadır. Sistemde, dış kabuktaki PV'nin etkisi incelenecek ve mevcut konum için en uygun değerler belirlenecektir.

Öncelikle, test odasının demir profiller ile strüktürü tamamlanmış, daha sonra alçıpan plakalar profillere vidalanarak genel çerçevesi yapılmıştır. Alçıpan plakalar ile oluşturulan dış duvarlar, çevreye olacak ısı kayıplarını ve çevreden gelecek ısı kazançlarını önlemek üzere camyünü ile yalıtılmıştır.

Daha sonra, güney cephesine fotovoltaik modülün arkasına 50 cm'lik ara boşluk genişliği bırakılarak termal kütle inşa edilmiştir. Termal kütle, dıştan içe, kaplama tuğla, düşey delikli tuğla, 3cm kalınlığında ısı yalıtım malzemesi olarak, extrüde polistren köpük (XPS) ve alçı sıvadan oluşmaktadır. Tavan, 3cm kalınlığında XPS ile kaplanıp, üzeri PVC plakalar ile kapatılmıştır. Taban ise 4cm kalınlığında XPS ile kaplanıp, üzeri laminat parke ile kapatılmıştır.

Termal kütlelerin birbirine temas eden kısımları, ısı geçişlerini engellemek için 4cm kalınlığında camyünü ile yalıtılarak yapışkanlı alüminyum folyo ile kapatılmıştır. Menfezler, test odasının kapısı ve dış cephedeki 3 adet modülü ayıran kapılarda malzeme olarak PVC kullanılmıştır. Isı geçişini tam anlamı ile önlemek için tek tarafı yapışkanlı sıkıştırılmış camyünü PVC üzerine yapıştırılmış ve dış kısımları, yapışkanlı alüminyum folyo ile yalıtılmıştır.

Aşağıda Şekil 4.5–4.10'da test odasının yapım aşamalarından birkaç uygulama fotoğrafı görünmektedir:



Şekil 4.5 Test odasının demir profiller ile strüktürünün tamamlanması.



Şekil 4.6 Alçıpan plakaların profillere vidalanarak çerçevenin tamamlanması.



Şekil 4.7 Alçıpan plakaların arasının camyünü ile yalıtılması.



Şekil 4.8 Alçıpan plakalar ile dış ortamdaki yalıtılması.



Şekil 4.9 Termal kütlelerin inşası ve iç ortam XPS ile yalıtılması.



Şekil 4.10 PVC kapı ve menfezlerin takılıp, sıkıştırılmış camyünü ile yalıtılması; Tavan ve tabanın XPS, laminat parke ve PVC plakalarla yalıtılması.

Test odasında kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri Çizelge 4.5'te verilmektedir.

Çizelge 4.5 Test odasında kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri.

Materyal		Parametreler	Nümerik Değerler
Termal Kütle	Kaplama tuğla	Derinlik (m)	0,02
		Yoğunluk(kg/m <sup>3</sup> )	1920
		Özgül ısı (kJ/kgK)	0,835
		Termal kondüktivite (W/mK)	0,72
	Düşey Delikli Tuğla	Derinlik (m)	0,20
		Yoğunluk(kg/m <sup>3</sup> )	1800
		Özgül ısı (kJ/kgK)	0,840
		Termal kondüktivite (W/mK)	0,69
	Ekstrude Polistren	Derinlik (m)	0,03
		Yoğunluk(kg/m <sup>3</sup> )	25
		Özgül ısı (kJ/kgK)	0,035
		Termal kondüktivite (W/mK)	1,30
	Sıva	Derinlik (m)	0,005
		Yoğunluk(kg/m <sup>3</sup> )	1680
		Özgül ısı (kJ/kgK)	1,085
		Termal kondüktivite (W/mK)	0,22

Piranometre, datalogger ve sensörlerin sisteme kurulup 04.02- 07.02.2008 tarihleri arasında ölçümler yapılmış, CFX yazılımındaki modelin oluşturulmasında elde edilen veriler kullanılmıştır.

#### 4.1.3 Kullanılan Cihazlar

Geliştirilen PV/T sistemin performansını görebilmek amacıyla, TÜBİTAK Hızlı Destek Projesi kapsamında alınan gereçler ve kullanım özellikleri Çizelge 4.6 ve ölçüm alma safhası için kurulan deneysel ölçüm sisteminin görünüşü Şekil 4.11 ve 4.12'de görüldüğü gibidir. Şekil 4.13'te görüldüğü gibi iç ortamın

sıcaklığını ölçmek için kullanılan sıcaklık sensörü, odanın yüksekliğinin tam orta noktasından ölçüm almaktadır. Ara boşluk'taki sıcaklık ölçüm sensörü duvar yüksekliğinin tam orta noktasında, diğer sensörler menfez yüksekliklerinin tam orta noktasından ölçüm almaktadır. Yüzey sıcaklığını ölçen sensörler 3 noktada: PV güneş panelinin ara boşluğa bakan yüzeyinin, duvarın (termal kütle) ara boşluğa bakan yüzeyinin ve termal kütle iç ortama bakan yüzeyinin yüksekliklerinin tam orta noktasında ölçüm almaktadır.

Çizelge 4.6 Ölçüm Amaçlı kullanılan cihaz ve sensörler.

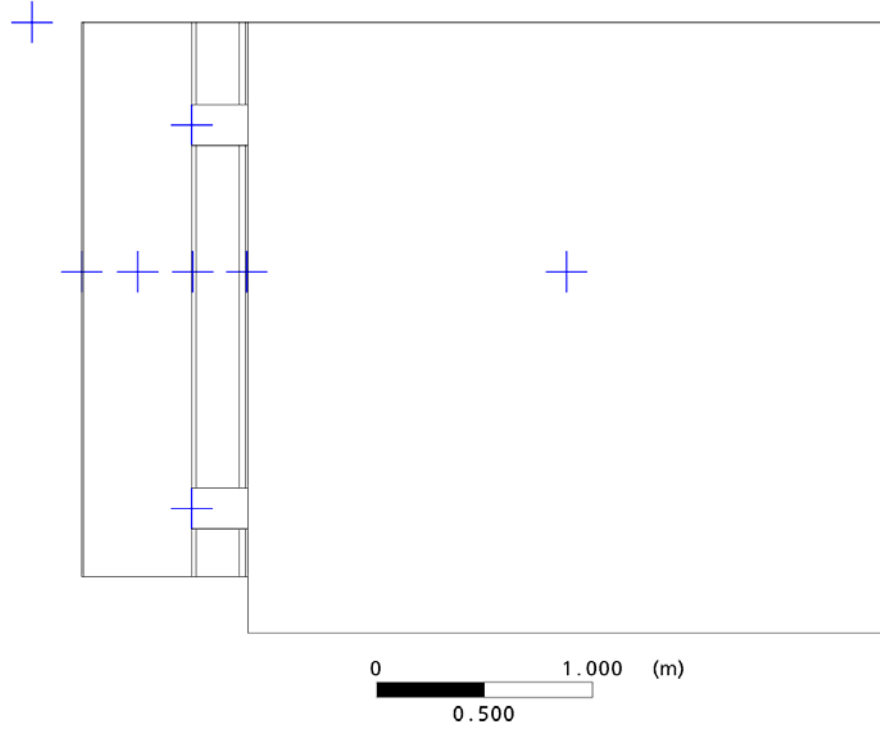
Sistem Elemanları	Kullanım amacı	Özellikleri
Sensörler	Güneş ışınım ölçer	Global güneş ışınımını ölçmeye yarayan CM 11 Piranometre, Sıcaklığa bağlı hassaslığı $-10^{\circ}\text{C}$ ile $+40^{\circ}\text{C}$ arasında $\pm 1\%$ ; çalışma sıcaklığı $-40^{\circ}\text{C}$ ile $+80^{\circ}\text{C}$ arasında; cevaplama süresi 12 saniyedir.
	Sıcaklık ve nem ölçer	Ortam sıcaklığı ve nemini ölçmeye yarayan 3 adet Model CS215 Nem ve sıcaklık sensörü, Bağlı Nem: $-20^{\circ}\text{C}$ ile $+60^{\circ}\text{C}$ arasında 0 ile 100%; $25^{\circ}\text{C}$ 'deki doğruluğu $\pm 2\%$ (10- 90% aralığında); $\pm 4\%$ (10- 100% aralığında), Sıcaklık: ölçüm aralığı $-40$ ile $+70^{\circ}\text{C}$ arasındadır; doğruluğu $5^{\circ}\text{C}$ ile $40^{\circ}\text{C}$ arasında $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ ; $-40^{\circ}\text{C}$ ile $70^{\circ}\text{C}$ arasında $\pm 0,9^{\circ}\text{C}$ 'dir. Filtre ile cevaplama süresi 120saniyedir.
	Ortam sıcaklığı ölçer	Ortam sıcaklıklarının ölçülmesini sağlayan 9 adet Campbell Scientific Model 107 sıcaklık sensörü: Bu sensörün sıcaklık ölçüm aralığı $-35^{\circ}\text{C}$ 'ten $+50^{\circ}\text{C}$ 'ye kadardır. Yer değiştirebilme hatası ise $0$ - $+50^{\circ}\text{C}$ arasında $\leq \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ olup $-40^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerinde $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ olmaktadır. Polinom linear doğruluğu, $-38^{\circ}\text{C}$ ile $50^{\circ}\text{C}$ arasında $\leq \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ ; $-24$ ile $+48^{\circ}\text{C}$ arasında $\leq \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ 'dir.
	Radyasyon kalkanı (CS 215)	Model CS215 Nem ve sıcaklık sensörünün ölçüm sonuçlarının ışıınımdan etkilenmesini önlemek için kullanılmaktadır.
Data-Logger Ünitesi	Veri depolama amaçlı kullanım	Pil destekli 2MB'lık CPU kullanımı için SRAM'i, 4MB'lık da opsiyonel hafızası olup 16 kanallı analog girişe sahiptir. Standart $-25^{\circ}\text{C}$ ile $+50^{\circ}\text{C}$ ; genişletilmiş olarak ise $-55^{\circ}\text{C}$ ile $+85^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında çalışmaktadır.
Elektrik Güç Ünitesi		10W pik güçte ve 15,1V gerilim üreterek, sensörlerin ve veri depolama ünitesinin ihtiyaç duyduğu enerjiyi sağlar.



Şekil 4.11 Datalogger kurulumu ve sensörlerin yerlerinin tespit edilip takılması.



Şekil 4.12 Datalogger'in bataryasını şarj eden PV ile dış ortam sıcaklık ve nem sensörünün dış cidara yerleştirilmesi.



Şekil 4.13 Deney düzeneğinde sıcaklık sensörlerinin yerleşimi.

#### 4.1.4 Deneysel Çalışma

Sistem aşağıdaki şekilde çalıştırılmıştır:

Gece boyunca soğuyan dış ortam, sabah günün doğması ve ışınımın güneş pilinin üzerine düşmesi ile birlikte pilin yüzey sıcaklığını arttırmaya başlamaktadır. Güneş pilinin yüzey sıcaklığının artması, ara boşluktaki havanın sıcaklığının ve duvarın ara boşluğa bakan yüzeyinin sıcaklığının yükselmesini sağlamaktadır. Gün içinde ara boşluk sıcaklığı, iç ortam sıcaklığından yüksek olduğu anda üst ve alt menfezler açılmış, ara boşlukta ısınan havanın üst menfezden odaya alınması, odadaki soğuk havanın ise alt menfezden ara boşluğa aktarılması sağlanmıştır. Ara boşluktaki sıcak havanın odaya, odadaki soğuk havanın da ara boşluğa aktarılması ile güneş pilinin arka yüzeyindeki sıcaklığın düşmesi, dolayısı ile güneş pilinin elektriksel veriminin artması sağlanmaktadır. Gün içinde ışınımın azalmasıyla sıcaklıklar düşmeye başlamaktadır. İç ortam sıcaklığının ara boşluk sıcaklığından yüksek olduğu anda odadaki sıcak havanın sistemi terk etmemesi için menfezler kapatılmıştır.

## 4.2 Hesap Modeli

Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (HAD), akışkanlardaki akış, ısı transferi ve diğer fiziksel proseslerin davranışlarının simülasyonu için kullanılan bilgisayar tabanlı çözüm sistemidir. Belirli bir bölgenin sınır koşulları belirlenir ve istenen bölgedeki akışkan akısının denklemlerinin çözümü ile gerçekleştirilir.

Güçlü grafik ve interaktif 3 boyutlu modellemeler ile hesaplama gücündeki son gelişmeler, HAD model oluşturma sürecini ortaya koymuştur. Bu durum, çok daha az çaba, zaman ve maliyetle sonuç almayı beraberinde getirmiştir. Gelişmiş çözümler, makul zamanda zor çözümleri gerçekleştirebilen algoritmalar içermektedir.

Tüm bu faktörlerin sonucu olarak HAD, tasarımın zaman skalasını azaltmayı sağlayan ve mühendislik dünyasında süreci geliştiren endüstriyel bir tasarım aracı olmuştur. HAD, maliyet açısından verimli ve model testi için doğru bir seçenek sağlamaktadır.

Hesaplama Akışkanlar Dinamiği çözümü, ısı transferi, yüksek türbülanslı karıştırıcılarda ve diğer fiziksel olarak ilişkili değişkenlerin önemli rol oynadığı çok karmaşık analizlerde oldukça gerekli hal alır. Bilgisayar destekli teknoloji, çok kompleks kısmi diferansiyel denklemleri çözmek için geliştirilmiştir. En önemli çözüm yöntemleri, sonlu fark, sonlu eleman ve sonlu hacim teknikleridir.

Bu çalışmadaki enerji denklemlerinin çözümünde “Sonlu Elemanlar Tekniği”ni kullanmaktadır. Bu yöntem:

- Karmaşık sınır koşullarına sahip sistemlere,
- Düzgün olmayan geometriye sahip sistemlere,
- Kararlı hal problemleri ve zamana bağlı problemlere,
- Lineer ve lineer olmayan problemlere uygulanabilmektedir.

Bu projede esas olarak, iki tür dönüşüm tekniğinin aynı alan içerisinde yapılması planlanmaktadır. Burada ana materyal olarak, güneş pili ve bir çeşit termal toplayıcı kullanılmıştır. PV/T sistemi oluşturan dönüştürücülerin davranışlarını ve performanslarını belirleyebilmek için bir deney düzeneği oluşturulmuş, bu dönüştürücülerin davranışlarını izlemek için TÜBİTAK Hızlı

Destek Projesi katkısı ile bir adet ölçüm sistemi satın alınmıştır. Ölçüm sistemi, sıcaklık, nem ve ışınım verilerini istenilen sıklıkta ölçebilen ve bilgisayara aktarabilen bir datalogger ile verileri elde eden sensörlerden oluşmaktadır. Bu sistemden elde edilen datalar grafikler haline getirilip irdelenmiş ve sistemlerin davranışları ölçülebilen veriler doğrultusunda Bulgular ve Tartışma kısmında yorumlanacaktır.

PV/T sistemin performansının belirlenebilmesi için her iki tür dönüştürücünün verimleri ayrı ayrı saptanmıştır. PV modülün veriminin belirlenebilmesi için elektriksel karakteristikler ölçülmüştür. Bunun için PV modülün açık devre gerilimini ve kısa devre akımını ölçmek amacıyla, bir akım ve gerilim sensörü kullanılmıştır. Akım ve gerilim sensörü ve bu sensörlerle ölçülen veriler bir datalogger ile kaydedilmiştir. PV yüzeyine ve güney duvarının ara boşluğa bakan cephesine gelen ışınımlar ise 2 piranometre ile ölçülmüştür. Bu sayede, yarı-geçirgen güneş pilinin geçirgenliği %10 olarak bulunmuştur.

PV ve termal toplayıcının bir arada kullanılması her iki ünitenin karakteristiğini değiştirmektedir. Var olan yerleşim, yönlendiriliş durumu ve çevre parametreleri için ANSYS CFX programında bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modelin, sonraki çalışmalarda farklı yerleşim ve çevre parametreleri için sistemden en iyi performansın alınabilmesi adına elde edilen veriler doğrultusunda optimizasyon yapılması amaçlanmıştır.

ANSYS CFX, bir sonlu elemanlar yazılım paketi olup, ilk olarak Swanson Analysis Systems Inc. tarafından 1970 yılında ticari olarak satılmaya başlanmıştır. O günden bu yana, tasarım mühendisleri tarafından strüktürel, termal, akış ve elektriksel analizler gibi mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır.

Bir sistemde her noktadaki parametrelerin değerlerini sensörlerle ölçüp, ölçülen detayı kayıt altına almak çok da mümkün değildir. Bu nedenle, geliştirilmiş nümerik yazılımlar kullanılmaktadır. Hız, basınç, akış oranları, sıcaklık değerleri gibi değişkenleri hesaplamak için kullanılan yazılıma Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği denmektedir.

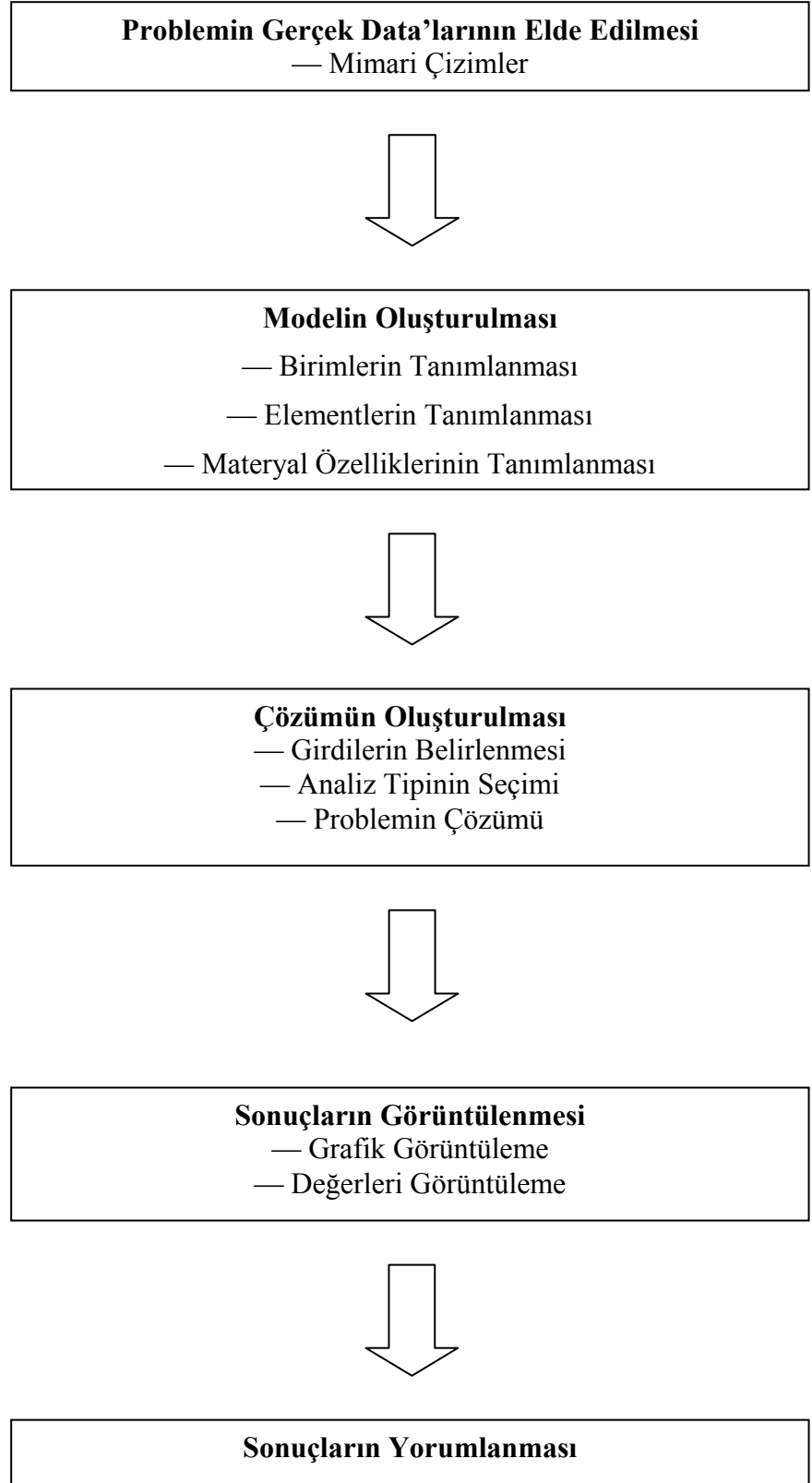
Sistemin çalıştırılması şu şekilde gerçekleşmektedir: Sistemde günün ışımasıyla birlikte PV modülün ve ara boşluktaki hava kütlesinin sıcaklığı yükselir. Öyle bir an gelir ki ara boşluk sıcaklığı oda sıcaklığından daha yüksek hale gelir. Bu noktada, alt ve üst menfezler açılarak ısınan havanın iç ortama

alınması sağlanır. Isınarak yükselen sıcak hava, üst menfezden oda içine alınırken, odadaki soğuyan hava alt menfezden ara boşluğa aktarılır.

#### **4.2.1 Teorik Model ve Problemin Tanımı**

Sonlu Elemanlar Yöntemi, devamlılığı ve Navier Stokes denklemlerini ayrıklaştırmak için kullanılan nümerik bir formülasyondur. CFX programında kullanılan kodlar, sonlu hacim yaklaşımındaki kısmi diferansiyel denklemlerinden elde edilen cebirsel denklem sistemlerini çözmektedir.

Sistemin Ansys'te Sonlu Elemanlar Analizi ile çözümü Şekil 4.14'te gösterilen adımlarla yapılmıştır.



Şekil 4.14 ANSYS kullanılarak sistemin genel çözüm yöntemi.

İlk aşama, test odası modelinin ölçümlerinin alınıp sistemin mimari çiziminin yapılmasından oluşmaktadır. İkinci aşamada, uygulama modelinin sonlu elemanlar modeli oluşturulmaktadır. Bu adımda, birimler, elementler ve materyal özellikleri tanımlanmakta olup, sonlu elemanlar modeli oluşturulmaktadır. Üçüncü aşama, çözümün oluşturulmasıdır. Bu aşamada, yükler belirlenir, sınır koşulları ve analizin tipi seçilir. Farklı disiplinler için yükler:

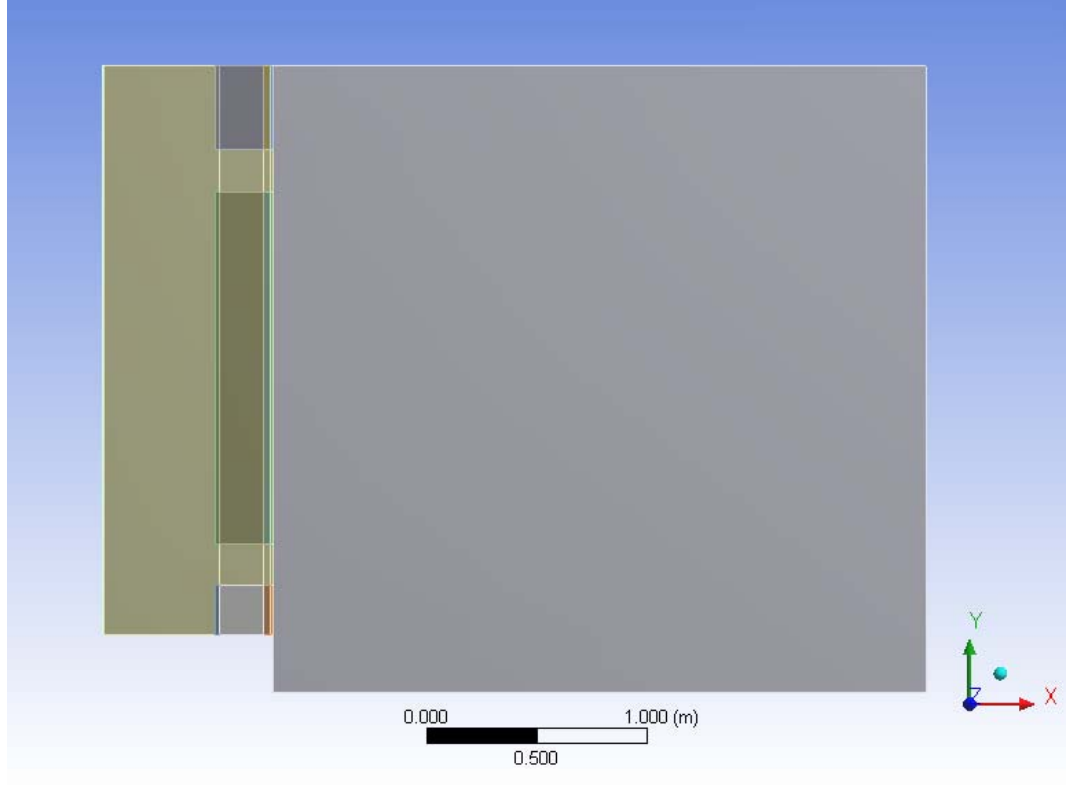
- Strüktürel (yer değiştirme ve kuvvet)
- Termal (sıcaklık ve ısı akış oranı)
- Elektriksel (elektriksel gerilim ve akım)
- Akışkan (hız ve basınç).

Yüklerin uygulandığı bölgeye göre yükler:

- Düşümsel yük: Bir düğüm noktasına uygulanan yüküdür. (kuvvet ve moment gibi)
- Yüzeysel yük: Bir yüzeye uygulanan dağıtılmış yüküdür. (akışkandaki basınç gibi)
- Hacimsel yük: Hacme uygulanan yüküdür. (termal analizdeki ısı üretim oranları gibi)

Sonraki adımlarda, sonuçlar grafik ve değer olarak görüntülenip yorumlanmaktadır. (Tjiptoprodjo, 2005)

Sistem geometrisi Şekil 4.15’te modellenmiştir.



Şekil 4.15 Sistem geometrisi.

Baz alınan denklemlerin ayrıklaştırılması “Sonlu Elemanlar Yöntemi”ne dayanmaktadır.

(0,50m’lik derinliği olan) ara boşlukta ısınan hava, oda içerisine (0,08m<sup>2</sup> alana sahip) üst menfezden alınmakta olup; serin hava ise iç ortamı alt menfezden terk ederek ara boşluğa geçmektedir.

Sistemin enerji analizi açısından performansı belirleyecek hesaplama kriterleri ve modelleri aşağıdaki adımlar izlenerek bulunmuştur. Bu modeller oluşturulurken problem, düzensiz koşullar altında zamana bağlı olarak dikkate alınmıştır. Sistemin enerji analizi için Jie et al. (2007)’nin Trombe duvar örneğine güneş pili entegrasyonu için yapmış olduğu çalışmadan yararlanılmıştır.

### ***PV Panelin Enerji Dengesi***

PV panelin enerji dengesi için önerilen denklem, PV hücrelerin ısı kapasitesi ihmal edildiğinde aşağıdaki gibidir (Jie et al., 2007).

$$\rho_G c_G \frac{\partial T_{PV}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X} \left( \lambda_G \frac{\partial T_{PV}}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \lambda_G \frac{\partial T_{PV}}{\partial Y} \right) + b \quad (4.1)$$

$$b = \left( S_c + S_p T_p \right) / D_G \quad (4.2)$$

$$S_c = [\alpha\tau + (1 - \tau)]I - E + h_{co}T_{dis} + \xi_1 h_{ro}T_{dis} + h_{ci}T_{ara} + \xi_2 h_{ri}T_{do} \quad (4.3)$$

$$S_p = -(h_{co} + \xi_1 h_{ro} + h_{ci} + \xi_2 h_{ri}) \quad (4.4)$$

### ***Hava Kanalındaki Enerji Dengesi***

Hava kanalındaki enerji dengesi aşağıdaki gibidir (Jie et al., 2007).

$$\rho_a D_a C_{hava} \frac{dT_{ara}}{dt} = h_{ci} (T_{PV} - T_{ara}) + h_{do} (T_{do} - T_{ara}) - \rho_a V_a D_a C_{hava} \frac{dT_{ara}}{dX} \quad (4.5)$$

Hava kanalındaki doğal taşınım olması durumundaki hava hareketi hızı aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır:

$$V_{ara} = \sqrt{\frac{0.5 g \bar{\beta} (T_{ust} - T_{alt}) L}{C_f (L/d) + \left( C_{in} A_S^2 / A_{alt}^2 \right) + \left( C_{out} A_S^2 / A_{ust}^2 \right)}} \quad (4.6)$$

$$\bar{\beta} = \frac{1}{\bar{T}} = \left( \frac{T_{alt} + T_{ust}}{2} \right)^{-1} = \frac{2}{T_{alt} + T_{ust}} \quad (4.7)$$

$$A_S = wxD_{ara} \quad (4.8)$$

$$C_f = 0,3 \times 1,368 Gr_x^{0.084} \quad (4.9)$$

Burada,

$A_S$  : hava kanalında havanın akışı yönüne dik doğrultudaki kesit alanı

$A_{alt}$ : Alt menfez açıklığının alanı (m<sup>2</sup>)

$A_{ust}$ : Üst menfez açıklığının alanı (m<sup>2</sup>)

$C_f$  : hava kanalındaki sürtünme faktörü

$C_{out}$  : Üst menfezdeki kayıp katsayısı (1)

$C_{in}$  : Alt menfezdeki kayıp katsayısı (1,5)

$Gr_x$  : Grashof sayısı

### ***Güney Duvarındaki Isı Transferi***

Güney duvarındaki ısı transferi aşağıdaki gibidir (Jie et al., 2007).

$$\frac{\partial T_d}{\partial t} = \frac{\lambda_d}{\rho_d C_d} \frac{\partial^2 T_d}{\partial Y^2} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned}
-\lambda_d \left( \frac{\partial T_d}{\partial Y} \right)_{y=0} &= h_{do} (T_{do} - T_{ara}) + \xi_3 h_{rdo} (T_{do} - T_p) \\
&+ I \alpha_d \tau_{NPV} (1 - \varepsilon) - \lambda_d \left( \frac{\partial T_d}{\partial Y} \right)_{y=D_d} \\
&= h_{di} (T_{di} - \bar{T}_{oda})
\end{aligned} \tag{4.11}$$

### ***İç Hacimdeki Isı Transferi***

İç hacimdeki ısı transferi aşağıdaki gibidir (Jie et al., 2007).

$$\begin{aligned}
\rho C_{hava} L_{oda} \left( \frac{dT_{oda}}{dt} \right) &= \frac{A_j}{D_{oda}} U_j (T_j - T_{oda}) + h_{di} (T_{di} - T_r) \\
&- \frac{\dot{m} C_{hava}}{D_{oda}} \frac{dT_r}{dX}
\end{aligned} \tag{4.12}$$

$$\dot{m} = \rho B_{ara} D_{ara} V_a \tag{4.13}$$

$$A_j = 2B_{oda} L_{oda} + 2L_{oda} L_{oda} + B_{oda} L_{oda} \tag{4.14}$$

Burada,

$\dot{m}$  : kütleli debi (kg/s)

$R_{trombe}$  : PV alanının toplam alana oranı

$A_j$  : Odanın güney cephesi hariç diğer cepheleri toplam alanı (m<sup>2</sup>)

$U_j$  : Odanın güney cephesi hariç diğer cepheleri toplam alanlarındaki ısı transfer katsayısı (W/m<sup>2</sup>K)

$L_{oda}$  : Odanın derinliği (m)

$B_{oda}$  : Odanın genişliği (m)

Güneş pilinin verimi aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır (Skoplaki and Palyvos, 2009).

$$\eta = \eta_r \times [1 - 0,002 \times (T_{PV} - T_r)] \quad (4.15)$$

Burada  $T_{PV}$  güneş pillerinin ortalama sıcaklığı,  $T_r$  referans sıcaklığı ( $25^\circ\text{C}$ ),  $\eta_r$  modülün referans verimini ifade etmektedir. Güneş pilinin referans verimi ise aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır (Chow, 2010).

$$\eta_r = \frac{P_{mpp}}{I \times A} = \frac{V_{mpp} \times I_{mpp}}{I \times A} \quad (4.16)$$

Burada,  $P_{mpp}$  nominal gücü,  $V_{mpp}$  maksimum güç noktasındaki gerilimi,  $I_{mpp}$  maksimum güç noktasındaki akımı,  $A$  pilin yüzey alanını ifade etmektedir.

BEPV/T sistemin günlük termal verimi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Tiwari et al., 2009).

$$\eta_{th} = \frac{\sum m_{hava}^o \times c_{hava} \times (T_{ust} - T_{alt})}{A \times \sum I \times 3600} \quad (4.17)$$

BEPV/T sistemin ortalama termal verimi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Tiwari et al., 2009).

$$\eta_{oth} = \frac{\eta}{0,38} + \eta_{th} \quad (4.18)$$

Duvardan iç ortama konveksiyonla gerçekleşen saatlik ısı kazanç ve kayıpları aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$Q_{konveksiyon} = h_{di} \times A_{du\ var} \times (T_{di} - T_i) \quad (4.19)$$

Duvardan iç ortama ısı ışınımıyla gerçekleşen saatlik ısı kazanç ve kayıpları aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

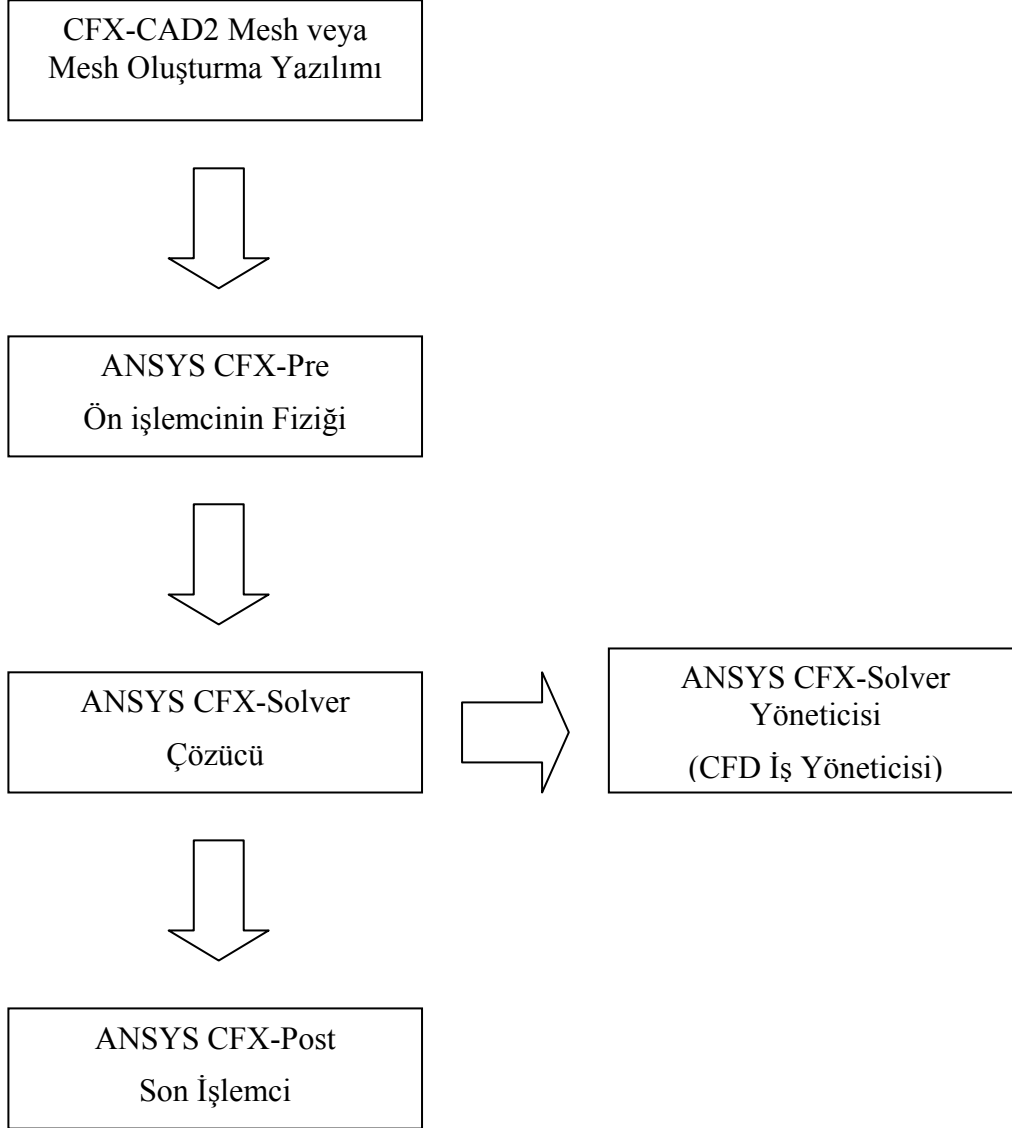
$$Q_{i\ sin\ im} = \varepsilon \times A_{du\ var} \times \sigma \times (T_{di}^4 - T_i^4) \quad (4.20)$$

Duvar ve iç ortam arasında gerçekleşen saatlik toplam ısı kazanç ve kayıpları aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$Q_{toplam} = Q_{konveksiyon} + Q_{i\ sin\ im} \quad (4.21)$$

### **4.2.2 CFX kullanılarak çözüm**

CFX kodunu kullanarak yaptırılan HAD çözümü, CFX-Build, CFX-Pre, CFX-Solver ve CFX-Post olmak üzere 4 aşamada gerçekleşmektedir. Bu çözümlemenin şematik gösterimi Şekil 4.16'da görüldüğü gibidir.

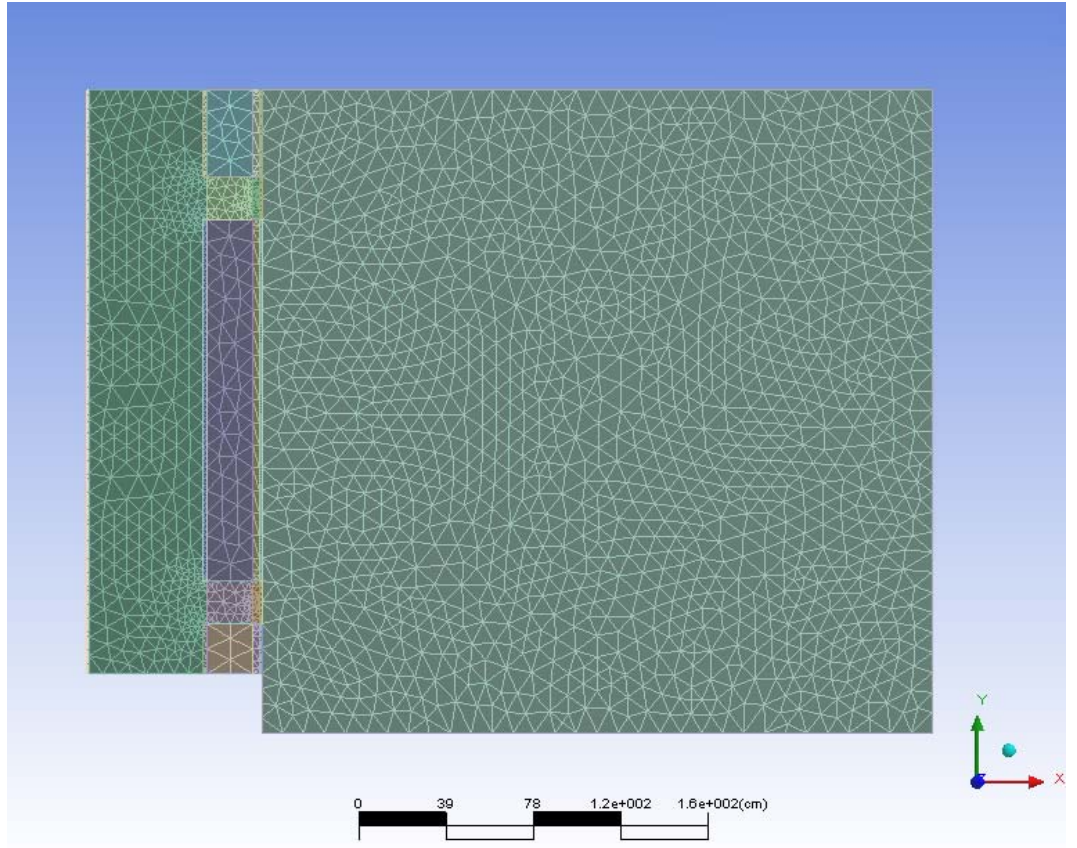


Şekil 4.16 ANSYS CFX'in Yapısı.

### ***CFX-Build***

Bu modül, çizilen geometrinin ayrıntılı bir şekilde tanımlanması ve ağ yapılandırması için kullanılmaktadır. Akışın modelleneceği geometri çizilip ayrıntılı olarak detaylandırılır. Bir akışın domain'inin ağ yapılandırması yapılması için farklı yöntemler vardır. Her ağ yapılandırması tipi çözüm için farklı özellikler verir. En çok kullanılan ağ yapısı tipleri tetrahedral ve hekzahedral ağ yapısıdır.

Sistemdeki hava akışının simülasyonu için ağ yapısı Şekil 4.17'de görüldüğü gibi yapılmıştır. Kontrol hacimleri, akış probleminin geometrisine uygun olarak üçgen elemanlara ayrılmıştır. Menfezlerin bulunduğu yerlerde kontrol hacimlerinde daha sık ağ yapılandırması yapılmıştır. Ağ yapısı oluşturmada 25970 tane düğüm noktası kullanılmıştır.



**Şekil 4.17** Sistemin ağ yapılandırması yapılmış durumu.

### ***CFX-Pre***

Bu modül, aynı zamanda ön işlemci (pre-processor) olarak da anılmaktadır. CFX-Build'ta oluşturulan ağ yapısı aktarılır, sınır koşulları ve akışkan özellikleri tanımlanır. Bu modülde, enerji denklemleri ve akış şekli (laminer, türbülanslı) tanımlanır; yürütülecek iterasyon sayısı ayarlanır; simülasyon modu (sabit yada periyodik rejim) tanımlanır; öngörülen zaman ayarlanır ve çözümleme modu başlatılır.

Yeni nesil fizik ön işlemcisi, ANSYS CFX-Pre, karmaşık geometrilerin her bölümünün en uygun ağ yapısını kullanmasını sağlayan çoklu ağ yapılarının alınmasına olanak sağlar.

Akış fiziği sınır koşulları, ilk değerler ve çözücü parametreler ANSYS CFX-Pre'de belirlenmektedir.

Girdiler, çıktılar ve açıklıklar gibi sınır koşulları, ısı transfer modelleri için sınır koşulları ANSYS CFX-Pre'de bulunmaktadır.

Dış ortam rüzgâr hızı, dış ortam sıcaklığı, PV yüzeyine ve güneşe bakan duvar üzerine düşen güneş ışınımaları değişken sınır koşulları; tavan, taban ve diğer duvarların sınır koşulları ise izotermal kabul edilmiştir.

Programın 2 boyutlu çözümleme özelliği bulunmamaktadır. Simetri sınır koşullarının belirlenmesi gereklidir çünkü 2 boyutlu problemi çözmek için de 3 boyutlu kod kullanılmaktadır. 2 boyutlu problemi çözmek için akış domain'i, kontrol hacmine z yönünde birim kalınlık verilerek, simetri sınır koşulları bu yüzeylere de uygulanır.

### ***CFX-Solver***

Bu modül, ANSYS CFX-Pre'de oluşturulmuş olan simülasyon probleminin değişkenlerinin çözümünü sağlar. Bu modülde kullanıcı, bir girdi tanımlamaz.

Çözücü, iteratif bir prosedür kullanarak her hacimdeki RANS denklemleri için çözümleme yapmaktadır. Çözüm ilerledikçe kod, yakınsama işlemi için sonuçları yazar. Belirlenen iterasyon sayısına ulaşılnca çözüm tamamlanır.

ANSYS CFX'in en önemli özelliği, bütün hidrodinamik denklemlerin tek bir sistemde çözülebildiği birleştirilmiş çözücüdür. Birleştirilmiş çözücü,

geleneksel ayrılmış çözücülerden daha hızlı olup, birleştirilmiş akış çözümlenmesinden çok daha az iterasyon gerektirmektedir.

ANSYS CFX-Solver Manager modülü, HAD'nin görev yönetimi için daha büyük kontrol sağlamaktadır. Bu modülün ana fonksiyonları:

- ANSYS CFX-Solver için girdi dosyalarını belirlemek,
- ANSYS CFX-Solver'ı başlatmak ve durdurmak,
- Çözümün gelişim adımlarını göstermek,
- Paralel çözümlenme için ANSYS CFX-Solver'ı düzenlemektir.

### ***CFX-Post***

Bu modül, HAD simülasyonlarının kolay görüntülenmesi ve işlenmesini sağlamaktadır. Akış bilgileri, kullanıcı tarafından, akış çizgileri, konturlar, hız vektörleri şeklinde sunulur.

ANSYS CFX-Post, analiz etmek ve simülasyon sonuçlarını sunmak için en gelişmiş etkileşimli son işlem grafik araçlarını sağlamaktadır. Önemli özellikleri: nicel son işlemci, rapor oluşturma, komut satırı, session (oturum) dosyası ve state (durum) dosyası girdisi, kullanıcı tanımlı değişkenler, görünürlük, geçirgenlik, renk ve çizgi taramasının kontrol edilebildiği grafik objelerin oluşturulması, tamamen programlanabilir dosyalara müsaade eder.

ANSYS CFX, gelişmiş bir çözücü ile güçlü bir ön ve son işlemci yeterliliklerini birleştiren genel amaçlı bir HAD yazılımıdır.

ANSYS CFX, sabit ve periyodik rejimdeki akışları; laminar ve türbülanslı akışları; ses altı, ses üstü ve ses ötesi akışları; ısı transferi ve termal ışınım; kaldırma kuvveti; çok fazlı akışlar; yanma ve parçacık izleme modellemesi yapılmasını sağlar. ANSYS CFX, güvenilir ve gelişmiş eşleştirilmiş çözücü; problemin tanımı, analizi ve sonuçlarının sunumu; menülere ve gelişmiş grafiklerin kullanımına, sezgisel ve etkileşimli kurgu prosesine gibi özelliklere sahiptir.

Modelde akış birim kalınlık verilerek 3 boyutlu çözdürülmüş olup akış değişkenleri 2 koordinata bağlıdır. Akış, periyodik rejimde zamana bağlı olarak çözümlenmektedir.

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu proje kapsamında geliştirilen BEPV/T sistemin ne derece performans gösterdiğini belirlemek amacıyla test odası inşa edilmiş ve yapılan ölçümler sonucunda elde edilen veriler grafiklere işlenmiştir. Bu veriler kullanılarak simülasyon modeli oluşturulmuş ve ölçüm değerleri ile hesap sonuçları kıyaslanarak yorumlanmıştır.

Sistem 01.01–30.04 tarihleri arasında 4 ay boyunca çalıştırılmış ve kararlı hale geldiği zaman olan 4–7 Şubat tarihlerindeki ölçüm sonuçları modelin CFX’te oluşturulması için kullanılmıştır.

Sistemdeki hava, doğal taşınım ile dolaştırılmaktadır. Sistem, 04.02-07.02.2008 tarihleri arasında çalıştırılmıştır. Ortam ve yüzey sıcaklık değerleri sistemdeki verileri ölçen sensörler tarafından ölçülerek datalogger’a kaydedilmiştir. Test odasının güneye bakan cephesine yerleştirilen piranometre ile dış ortamdaki toplam güneş ışınımı değeri; termal kütle yüzeyine monte edilmiş olan piranometre ile ise termal kütle üzerine düşen güneş ışınımı değerleri ölçülmüş ve yarı-geçirgen güneş pilinin geçirgenliği deneysel olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada, yarı-saydam a-Si güneş pilinin güneş duvarı geçirgen örtüsü olarak kullanılmasıyla %10 oranında güneş ışınımı geçirgenliği sağlanmış, diğer çalışmalardan farklı olarak BEPV/T sistemin ısı kısmının enerji girişi artırılmıştır.

Sistemin çalışma prensibine göre, gece boyunca dış ortam sıcaklığı düşeceğinden, dış ortam sıcaklığının, ara boşluktaki havanın sıcaklığından düşük olduğu andan itibaren ara boşluktan dış ortama bir ısı kaybı olmaya başlar. Aynı şekilde, ara boşluktaki havanın sıcaklığı, odadaki havanın sıcaklığından düşük olduğu andan itibaren odadan ara boşluğa doğru ısı geçişi yaşanır. Bu durum, enerji dengesi oluşana dek sürer. Sabah gün ışımasıyla birlikte dış ortam sıcaklığı yükselmeye başlar. Gece iç ortamdan dış ortama olan ısı geçişi bu defa dış ortamdan ara boşluğa, ara boşluktan da oda içine doğru gerçekleşir. Ara boşlukta ısınan hava yükselerek üst menfeze doğru ilerlerken soğuk hava daha yoğun olduğundan alt menfezin kısma doğru ilerler. Ara boşluktaki havanın sıcaklığı, oda içerisindeki havanın sıcaklığından yüksek olduğunda menfezler açılarak ara boşlukta ısınan hava üst menfezden oda içerisine alınır. Odadaki soğuk hava ise alt menfezden odayı terk eder ve ara boşluğa dolar. Böylece bir sirkülasyon oluşur. Bu hava döngüsü ara boşluğun sıcaklığının odanın iç ortam sıcaklığına eşit

olduğu ana kadar devam eder ve bu sırada menfezler kapatılarak ısınan havanın odayı menfezlerden terk etmesine engel olunur.

Yukarıda anlatılan çalışma prensibine uygun olarak iç ortam, ara boşluk ve dış ortam sıcaklıkları kontrol edilmiş ve sistem 04- 07 Şubat 2008 tarihleri arasında Çizelge 5.1’de görüldüğü şekilde çalıştırılmıştır.

Çizelge 5.1 Menfezlerin açılış ve kapanış saatleri.

TARİH	AÇILIŞ	KAPANIŞ
04.02.2008	11.00	17.00
05.02.2008	11.00	16.00
06.02.2008	11.00	17.00
07.02.2008	11.00	17.00

Çizelge 5.2’de güneş ışınımı, dış ortam sıcaklıkları, güneş pilinin yüzey sıcaklıkları ve iç ortam sıcaklıklarının ölçüm değerleri verilmektedir. Havanın kütleli debisi ise Eşitlik (4.13) ile hesaplanmaktadır.

Çizelge 5.2 04–07 Şubat tarihleri arası saatlik Güneş ışınımı,  $T_{dış}$ ,  $T_{PV}$ ,  $T_{ara}$ ,  $m$  değerleri.

Zaman	Güneş Işınımı (W/m <sup>2</sup> )	$T_{dış}$ (°C)	$T_{PV}$ (°C)	$T_{iç}$ (°C)	$m$ (kg/s)	
04.02.2008	11.00	695,67	15,93	29,85	18,23	0,015
	12.00	805,50	18,14	43,30	22,23	0,031
	13.00	797,63	20,29	48,22	26,42	0,033
	14.00	790,98	22,06	49,75	29,07	0,035
	15.00	674,22	22,17	49,82	31,07	0,035
	16.00	511,52	20,99	44,60	31,32	0,034
05.02.2008	11.00	638,60	17,01	29,35	18,10	0,013
	12.00	750,88	20,12	43,78	21,60	0,035
	13.00	747,13	21,21	47,35	26,22	0,033
	14.00	689,97	20,83	46,57	28,53	0,033
	15.00	623,37	20,83	45,87	29,94	0,033
06.02.2008	11.00	403,88	15,01	23,95	18,49	0,001
	12.00	639,12	18,47	36,82	21,19	0,024
	13.00	534,22	19,68	40,77	23,99	0,029
	14.00	529,28	20,06	39,83	25,32	0,030
	15.00	323,92	19,03	37,03	26,15	0,030
	16.00	383,92	19,29	35,18	25,82	0,027
07.02.2008	11.00	591,18	11,54	24,22	17,92	0,010
	12.00	672,88	14,09	37,65	20,16	0,029
	13.00	635,02	15,68	39,63	23,80	0,029
	14.00	529,78	16,08	37,37	25,03	0,029
	15.00	594,62	18,37	43,18	26,93	0,030
	16.00	374,15	17,17	37,53	27,31	0,030

Sistemin günlük ortalama termal verimi Eşitlik (4.18) ile hesaplanmıştır. Sistemin günlük ortalama termal verimleri Çizelge 5.3'te verilmektedir. Çizelgede de görüldüğü gibi günlük ortalama termal verim 7 Şubat günü %27,2 ile diğer günlere kıyasla en yüksek değeri almaktadır.

Çizelge 5.3 04–07 Şubat tarihleri arası saatlik  $\eta_{\text{oth}}$  değerleri.

Tarih	$\eta_{\text{oth}}$ (%)
04.02.2008	23,2
05.02.2008	20,3
06.02.2008	22,3
07.02.2008	27,2

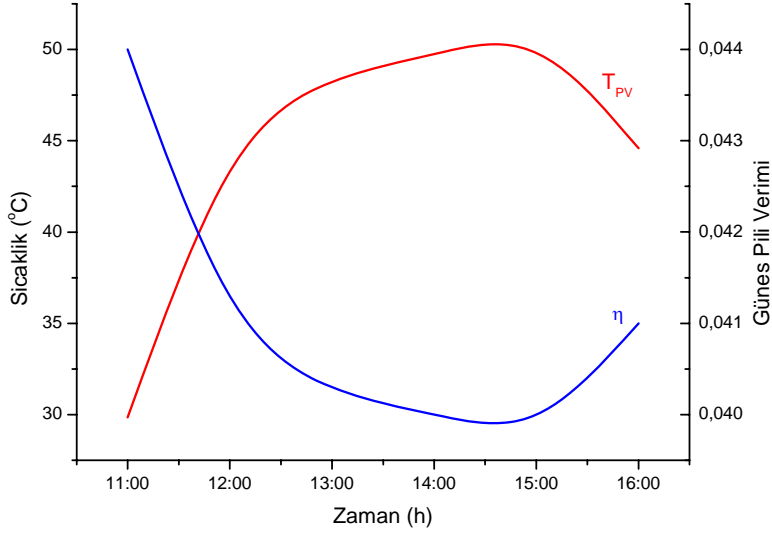
Kıyaslama yapmak için güneş pili hücrelerinin saatlik sıcaklık değişimleri ile güneş pilinin veriminin saatlik değişimleri 4, 5, 6, 7 Şubat tarihleri için Şekil 5.1’de verilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi güneş pilinin sıcaklığı artarken, güneş pilinin verimi azalmaktadır. Bu durum, önceki araştırmacıların da bulguları ile örtüşen bir sonuçtur.

Şekil 5.1 (a)’da görüldüğü gibi 4 Şubat tarihinde, güneş pilinin sıcaklığı saat 11.00’de 29,85°C iken, saat 15.00’te 49,82°C’ye kadar yükselmekte ve saat 16.00’da 44,60°C’ye düşmektedir. Güneş pilinin verimi ise, güneş pili sıcaklığının gün içinde en düşük olduğu saat 11.00’de 0,0440 iken, güneş pilinin sıcaklığının gün içinde en yüksek değerde olduğu saat 15.00’te pilin verimi 0,0400’e kadar düşmekte ve saat 16.00’da pil sıcaklığının azalması ile tekrar yükselerek 0,0410’a çıkmaktadır.

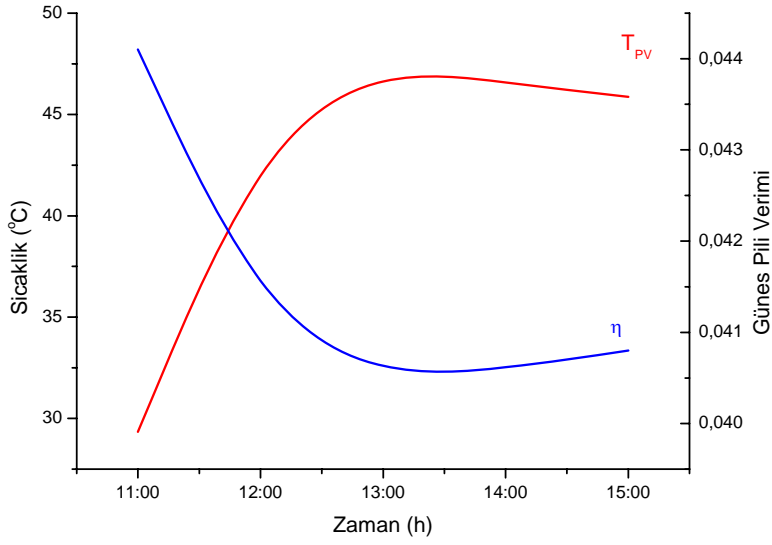
Şekil 5.1 (b)’de görüldüğü gibi 5 Şubat tarihinde, güneş pilinin sıcaklığı, saat 11.00’de 29,35°C ile en düşük değerde iken güneş pilinin verimi 0,0441 ile en yüksek değeri vermektedir. Güneş pilinin sıcaklığı artarak saat 13.00’te 47,35°C ile gün içindeki en yüksek değerine ulaştığında, güneş pilinin verimi 0,0405 ile gün içindeki en düşük değeri vermektedir. Pil sıcaklığı giderek azalmakta ve 45,87°C’yi gösterdiğinde pilin verimi 0,0408 olmaktadır.

Şekil 5.1 (c)’de görüldüğü gibi 6 Şubat tarihinde, güneş pilinin sıcaklığı, saat 11.00’de 23,95°C ile gün içindeki en düşük değerinde iken pilin verimi 0,0452 ile gün içindeki en yüksek değerini almaktadır. Saat 13.00’te gün içindeki en yüksek değerine ulaşan pil sıcaklığı 40,77°C iken pilin verimi gün içindeki en düşük değeri olan 0,0418 olmaktadır. Zamanla pilin sıcaklığı azalarak saat 16.00’da 35,18°C’ye ulaşmakta ve pilin verimi artarak 0,0429 olmaktadır.

Şekil 5.1 (d)'de görüldüğü gibi 7 Şubat tarihinde, pil sıcaklığı saat 11.00'de  $24,22^{\circ}\text{C}$  olan gün içindeki en düşük değerinde iken pilin verimi 0,0452 ile gün içindeki en yüksek değerini almaktadır. Zamanla pilin sıcaklığı artmakta, saat 13.00'te  $39,63^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaşmakta olup bu saatte pilin verimi 0,0420 olmaktadır. Saat 14.00'te  $37,37^{\circ}\text{C}$ 'ye düşen pilin sıcaklığı verimin artmasına sebep olmakta ve verim 0,0425 değerini bulmaktadır. Saat 15.00'te pilin sıcaklığı gün içindeki en yüksek değeri olan  $43,18^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaşmakta ve pilin verimi 0,0413 olmaktadır. Saat 16.00'da ise pilin sıcaklığı düşerek  $37,53^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaşmakta ve verim tekrar artarak 0,0425 değerini almaktadır.

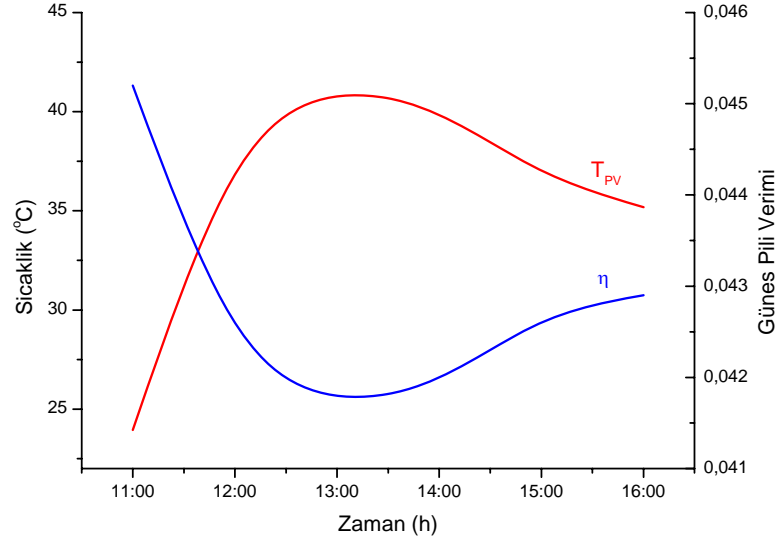


(a)

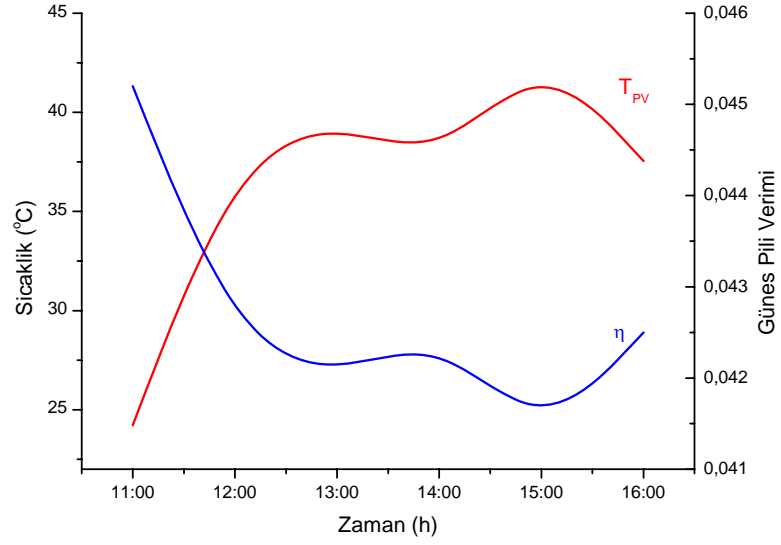


(b)

Şekil 5.1 Güneş pili veriminin PV hücre sıcaklıklarına göre saatlik değişimi (a) 4 Şubat günü için, (b) 5 Şubat günü için.



(c)



(d)

Şekil 5.1 Güneş pili veriminin PV hücre sıcaklıklarına göre saatlik değişimi (c) 6 Şubat günü için, (d) 7 Şubat günü için.

Şekil 5.2'de havanın kütleli debisinin ara boşluk sıcaklığı ve iç ortam sıcaklığına bağlı değişimi saatlik olarak verilmektedir.

Şekil 5.2 (a)'da görüldüğü gibi 4 Şubat günü saat 11.00'de iç ortam sıcaklığı ve ara boşluk sıcaklığı sırası ile  $18,23^{\circ}\text{C}$  ve  $19,40^{\circ}\text{C}$  iken, havanın kütleli debisi  $0,015\text{kg/s}$ 'dir. İç ortam ve ara boşluk sıcaklıkları giderek zamanla artmakta ve saat 15.00'te sırası ile  $31,07^{\circ}\text{C}$  ve  $38,22^{\circ}\text{C}$  değerlerine ulaştığında, havanın kütleli debisi artarak  $0,035\text{kg/s}$ 'ye çıkmaktadır.

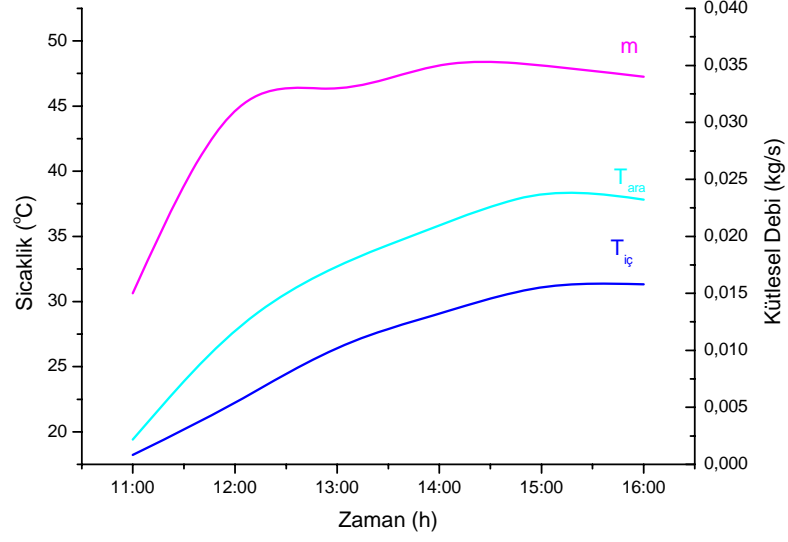
Saat 16.00'da ise iç ortam ve ara boşluk sıcaklıkları sırası ile  $31,32^{\circ}\text{C}$  ve  $37,82^{\circ}\text{C}$  olmakta, havanın kütleli debisi ise  $0,034\text{kg/s}$  değerini almaktadır. Ara boşluk ve iç ortam sıcaklıkları arasındaki fark arttıkça bu iki ortam arasındaki menfezlerden sağlanan birim zamandaki hava taşınımı miktarı artmaktadır. Bu durum, Şekil 5.2 (a),(b),(c),(d)'deki 4, 5, 6, 7 Şubat günlerine ait sıcaklık- kütleli debi değişim grafiklerinden de okunmaktadır.

Şekil 5.2 (b)'de 5 Şubat günü için havanın kütleli debisinin ara boşluk ve iç ortam sıcaklık değerleri ile olan saatlik değişimi görülmektedir. Saat 11.00'de iç ortam ve ara boşluk sıcaklıkları sırası ile  $18,10^{\circ}\text{C}$  ve  $19,04^{\circ}\text{C}$  iken havanın kütleli debisi  $0,013\text{kg/s}$  olmaktadır. Saat 15.00'te iç ortam ve ara boşluk sıcaklıkları artarak sırası ile  $29,94^{\circ}\text{C}$  ve  $36,12^{\circ}\text{C}$  iken havanın kütleli debisi  $0,033\text{kg/s}$  olmaktadır.

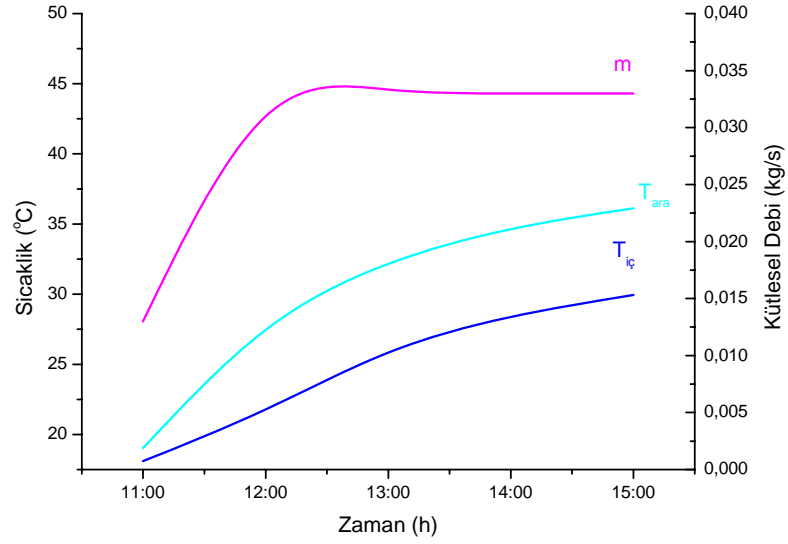
Şekil 5.2 (c)'de 6 Şubat günü için havanın kütleli debisinin ara boşluk ve iç ortam sıcaklık değerleri ile olan saatlik değişimi görülmektedir. Saat 11.00'de iç ortam ve ara boşluk sıcaklıkları sırası ile  $18,49^{\circ}\text{C}$  ve  $18,50^{\circ}\text{C}$  iken havanın kütleli debisi  $0,001\text{kg/s}$ 'dir. Saat 15.00'te iç ortam ve ara boşluk sıcaklıkları artarak sırası ile  $26,15^{\circ}\text{C}$  ve  $31,12^{\circ}\text{C}$  olmakta ve havanın kütleli debisi ise  $0,03\text{kg/s}$  değerini almaktadır. Daha sonra saat 16.00'da düşen sıcaklık değerleri iç ortam için  $25,82^{\circ}\text{C}$ ; ara boşluk için  $29,90^{\circ}\text{C}$  değerlerini almakta ve sıcaklıklardaki bu düşüş havanın kütleli debisini de düşürerek  $0,027\text{kg/s}$  değerini almasına sebep olmaktadır.

Şekil 5.2 (d)'de 7 Şubat günü için havanın kütleli debisinin ara boşluk ve iç ortam sıcaklık değerleri ile olan saatlik değişimi görülmektedir. Saat 11.00'de iç ortam ve ara boşluk sıcaklıkları sırası ile  $17,92^{\circ}\text{C}$  ve  $18,50^{\circ}\text{C}$  iken havanın kütleli debisi  $0,01\text{kg/s}$ 'dir. Zamanla sıcaklık değerleri artarak saat 16.00'da iç

ortam ve ara boşluk için sırası ile  $27,31^{\circ}\text{C}$  ve  $32,46^{\circ}\text{C}$  değerlerini almakta, kütleli debi ise artarak  $0,03\text{kg/s}$  olmaktadır.

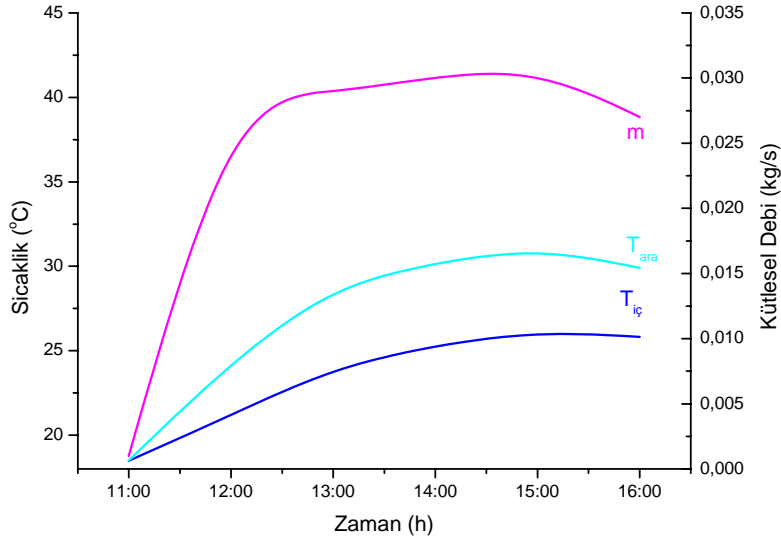


(a)

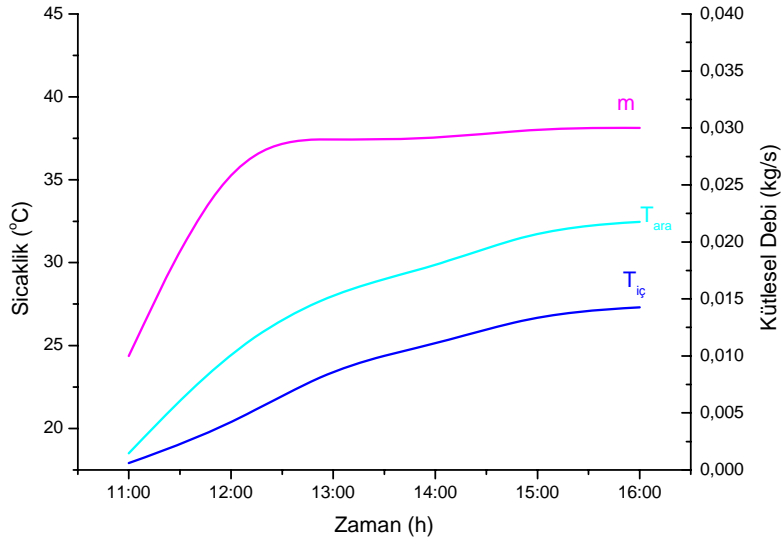


(b)

Şekil 5.2 Havanın kütleli debisinin, ara boşluk ve iç ortam sıcaklıklarına bağlı saatlik değişimi (a) 4 Şubat günü için, (b) 5 Şubat günü için.



(c)



(d)

Şekil 5.2 Havanın kütleli debisinin, ara boşluk ve iç ortam sıcaklıklarına bağlı saatlik değişimi (c) 6 Şubat günü için, (d) 7 Şubat günü için.

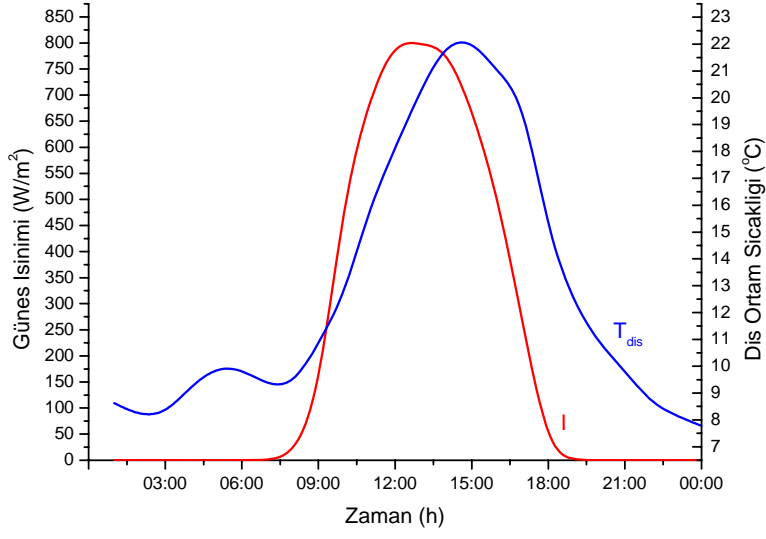
Şekil 5.3'te 4, 5, 6, 7 Şubat 2008 tarihleri için İzmir'in iklimsel parametreleri görülmektedir. Dış ortam sıcaklıklarının dikey düzleme gelen toplam güneş ışınımına bağlı saatlik değişimleri verilmektedir. Bu 4 gün için de güneş ışınımı sabah 8.00'de başlamakta ve 19.00'da güneşin batışı ile son bulmaktadır.

Şekil 5.3 (a)'da 4 Şubat gününde dikey düzlemdeki toplam güneş ışınımı saat 12.00'de gün içindeki en yüksek değeri olan  $805,50\text{W/m}^2$  değerini almaktadır. Sonraki saatlerde güneş ışınımı azalarak gelmekte ve saat 19.00'da günün batması ile son bulmaktadır. Dış ortam sıcaklığı ise saat 15.00'te gün içindeki en yüksek değeri olan  $22,17^\circ\text{C}$  değerini almaktadır. Sonraki saatlerde, güneş ışınımının da azalmasından dolayı dış ortam sıcaklığı da düşerek gün sonunda saat 24.00'te  $7,78^\circ\text{C}$  olmaktadır.

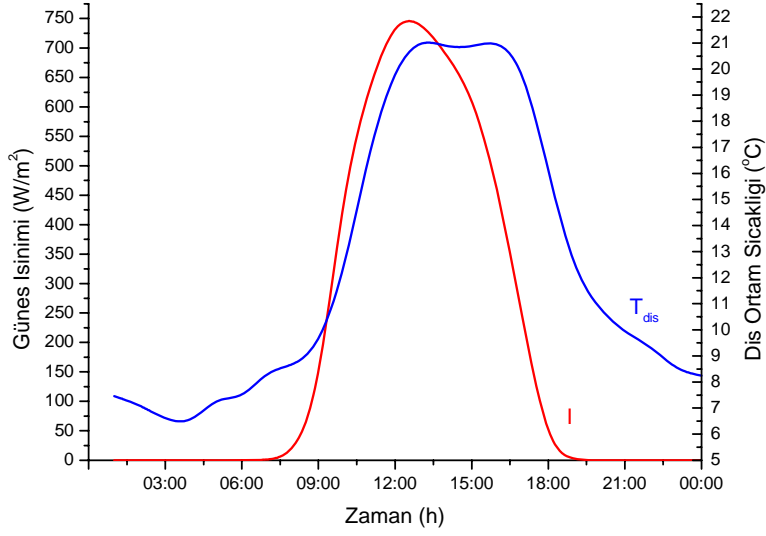
Şekil 5.3 (b)'de 5 Şubat gününde dikey düzlemdeki toplam güneş ışınımı saat 12.00'de gün içindeki en yüksek değeri olan  $750,88\text{W/m}^2$  değerini almaktadır. Sonraki saatlerde güneş ışınımı azalarak gelmekte ve saat 19.00'da günün batması ile son bulmaktadır. Dış ortam sıcaklığı ise saat 13.00'te gün içindeki en yüksek değeri olan  $21,21^\circ\text{C}$  değerini almaktadır. Saat 14.00 ve 15.00'te dış ortam sıcaklıkları  $20,83^\circ\text{C}$  olup saat 16.00'da artarak  $21,15^\circ\text{C}$  olmaktadır. Güneş ışınımının azalması ve saat 19.00'da günün batması ile birlikte dış ortam sıcaklığı azalarak saat 24.00'te  $8,24^\circ\text{C}$ 'ye ulaşmaktadır.

Şekil 5.3 (c)'de 6 Şubat gününde dikey düzlemdeki toplam güneş ışınımı saat 12.00'de gün içindeki en yüksek değeri olan  $639,12\text{W/m}^2$  değerini almaktadır. Sonraki saatlerde güneş ışınımı azalarak gelmekte ve saat 19.00'da günün batması ile son bulmaktadır. Dış ortam sıcaklığı ise saat 14.00'te gün içindeki en yüksek değeri olan  $20,06^\circ\text{C}$  değerini almaktadır. Sonraki saatlerde, güneş ışınımının da azalmasından dolayı dış ortam sıcaklığı da düşerek gün sonunda saat 24.00'te  $10,02^\circ\text{C}$  olmaktadır.

Şekil 5.3 (d)'de 7 Şubat gününde dikey düzlemdeki toplam güneş ışınımı saat 12.00'de gün içindeki en yüksek değeri olan  $672,88\text{W/m}^2$  değerini almaktadır. Dış ortam sıcaklığı ise saat 15.00'te gün içindeki en yüksek değeri olan  $18,37^\circ\text{C}$  değerini almaktadır. Güneş ışınımının azalması ve saat 19.00'da günün batması ile birlikte dış ortam sıcaklığı azalarak saat 24.00'te  $6,96^\circ\text{C}$  olmaktadır.

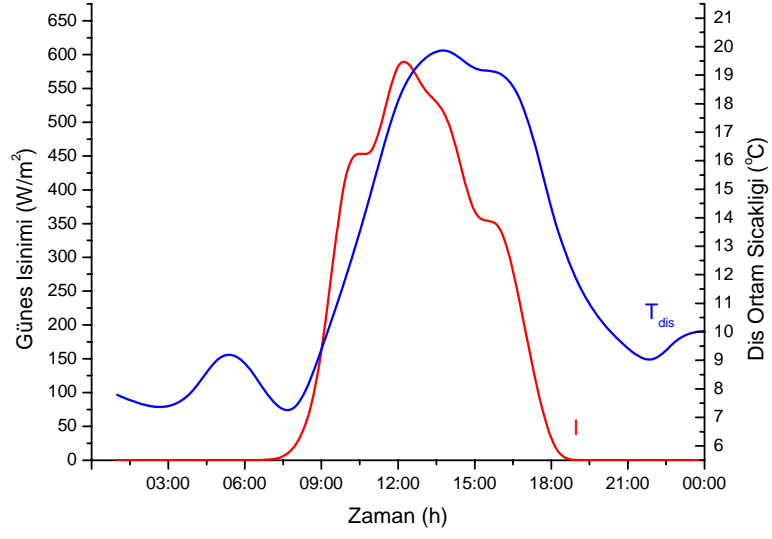


(a)

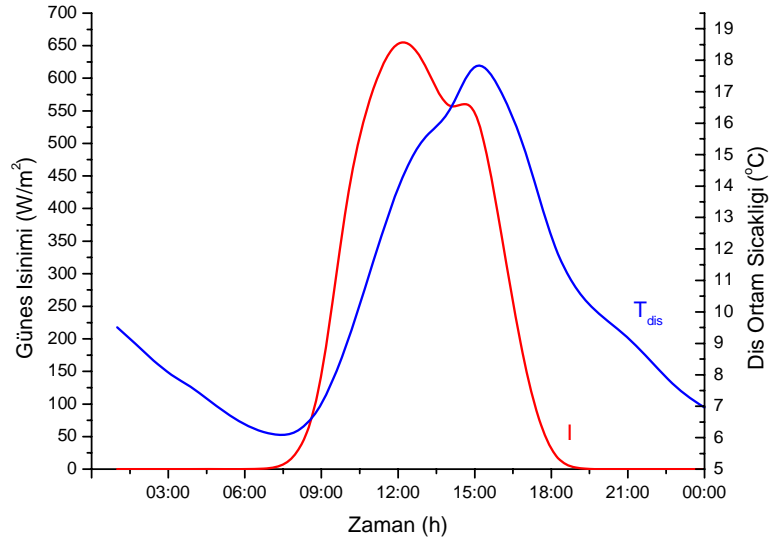


(b)

Şekil 5.3 Dış ortam sıcaklığının dikey düzleme gelen toplam güneş ışınımına bağlı saatlik değişimi (a) 4 Şubat günü için, (b) 5 Şubat günü için.



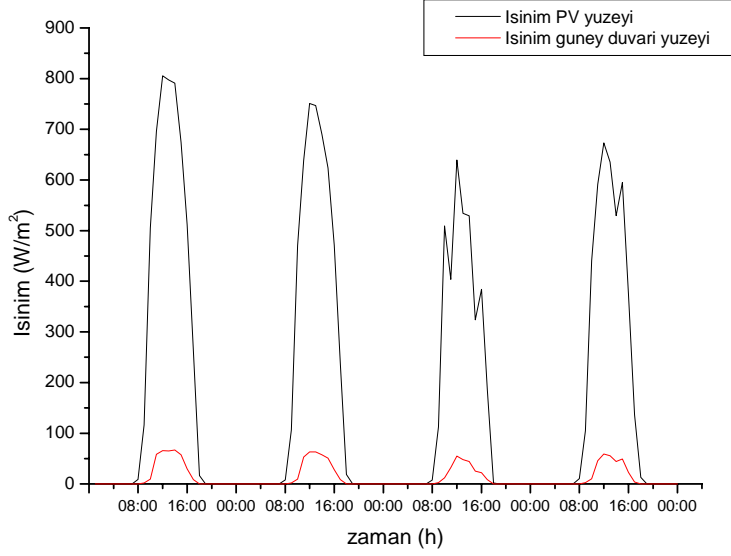
(c)



(d)

Şekil 5.3 Dış ortam sıcaklığının dikey düzleme gelen toplam güneş ışınımına bağlı saatlik değişimi (c) 6 Şubat günü için, (d) 7 Şubat günü için.

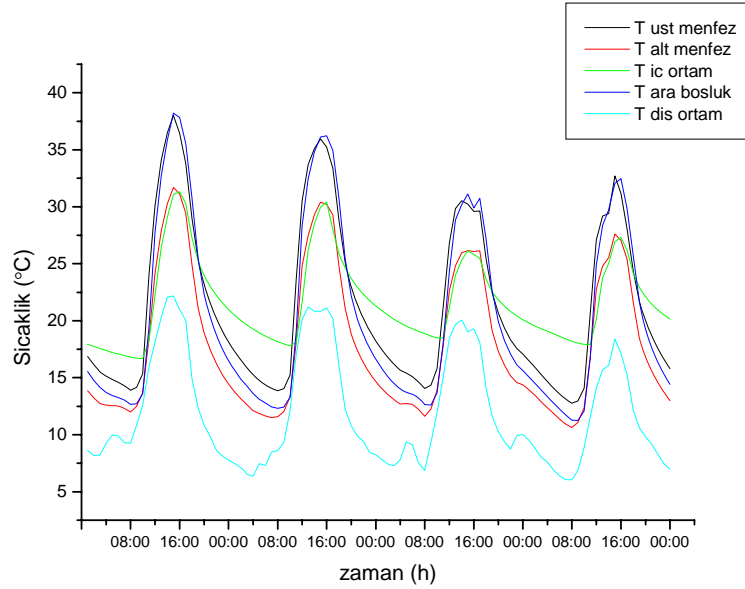
Şekil 5.4'te dış ve iç kabuğa- güneş pili ve termal kütlelerin ara boşluğa bakan yüzeyine- düşen güneş ışınımı değerleri 4, 5, 6, 7 Şubat günleri için saatlik olarak verilmektedir. Dış kabukta kullanılan yarı-geçirgen güneş pilinin geçirgenlik değeri grafikten de görüldüğü gibi %10 civarındadır.



Şekil 5.4 Dış ve iç kabuk üzerine gelen toplam güneş ışınımının saatlik değişimi (4- 7 Şubat tarihleri arası).

Şekil 5.5'te 4, 5, 6, 7 Şubat günleri için iç ortam, dış ortam, ara boşluk, üst ve alt menfez sıcaklık değerleri saatlik olarak verilmektedir. 5 Şubat'ta dış ortam sıcaklığı saat 01.00'de 7,46°C iken saat 06.00'ya kadar azalmakta ve 7,30°C'ye düşmektedir. Daha sonra dış ortam sıcaklığı artarak saat 13.00'te 21,21°C'ye ulaşarak gün içindeki en yüksek değerini almaktadır. Takip eden saatlerde güneş ışınımının da azalarak günün batması sonrası saat 24.00'te dış ortam sıcaklığı 8,24°C olmaktadır. Grafikten de görüldüğü gibi ara boşluk, alt ve üst menfez sıcaklıkları saat 07.00'ye kadar dış ortam sıcaklığına paralel olarak azalmakta ve saat 07.00'den sonra yine paralel olarak saat 15.00'e kadar artmaktadır. Saat 01.00–07.00 arasında sıcaklık değerleri büyükten küçüğe doğru üst menfez, ara boşluk ve alt menfez sıcaklıkları olarak sıralanmaktadır. Üst menfez hizasındaki havanın sıcaklığının, alt menfez ve ara boşluktaki havanın sıcaklık değerlerinden yüksek olması, ara boşlukta ısınan havanın yükselmesi ile açıklanabilmektedir. Saat 08.00'de günün ışması ile birlikte sıcaklık değerleri yükselmektedir. Menfezlerin saat 11.00'de açılması ile ara boşlukta ısınan hava, üst menfezden iç

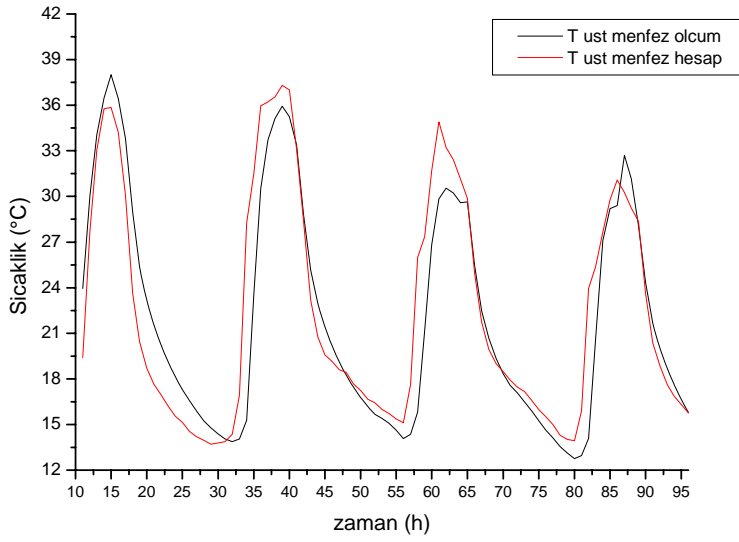
ortama alınarak iç ortam sıcaklığının artmasına neden olurken alt menfezden ara boşluğa transfer edilen iç ortamdaki soğuk hava ise ara boşlukta ısınarak üst menfezden tekrar oda içerisine alınır. Bu durum, iç ortam sıcaklığının ara boşluk sıcaklığından yüksek olduğu saate kadar devam etmekte ve bu saatte menfezler kapatılarak iç ortamda sıcaklığın düşmesine engel olunmaktadır. Menfezler saat 16.00'da kapatıldıktan sonra grafikten de görüleceği üzere sıcaklıklar büyükten küçüğe doğru iç ortam, üst menfez, ara boşluk, alt menfez ve dış ortam sıcaklıkları şeklinde sıralanmaktadır. 4, 6, 7 Şubat günlerindeki sıcaklık değişimleri grafikte de görüldüğü gibi 5 Şubat günündeki değişime benzer gerçekleşmektedir.



Şekil 5.5 Dış ortam, ara boşluk, iç ortam, üst ve alt menfezlerdeki sıcaklıkların saatlik değişimi (4- 7 Şubat tarihleri arası).

Şekil 5.6'da 4- 7 Şubat tarihleri arasında üst menfezdeki havanın sıcaklığının ölçüm değerleri ve modelleme programından alınan hesap sonuçları saatlik olarak görülmektedir. 5 Şubat günü için grafik irdelendiğinde, gece saat 01.00'de üst menfezdeki ölçüm ve hesap değerleri sırası ile 17,31°C ve 15,15°C'dir. Gece güneş ışınımının olmaması ve dış ortam sıcaklığının iç ortam sıcaklığından düşük olması nedeni ile iç ortamdan dış ortama ısı kaybı olmaktadır. Bu ısı kaybı güneş pilinin ve termal kütleinin yüzey sıcaklıkları, ara boşluk, iç ortam, alt ve üst menfez sıcaklıklarının düşmesine sebep olmaktadır. Saat

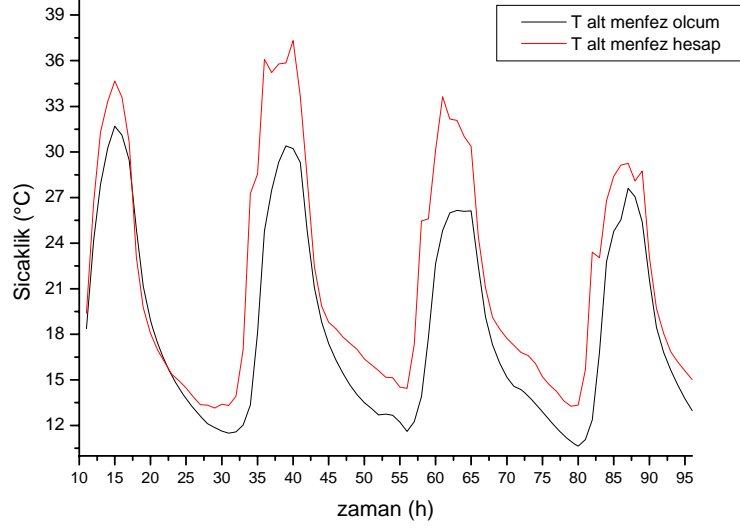
08.00'de günün doğmasına kadar üst menfez sıcaklığı da düşmekte, ölçüm ve hesap değerleri de sırası ile 13,87°C ve 14,35°C değerlerini vermektedir. Güneş ışınımının artması ile birlikte yükselen sıcaklıklar saat 15.00'te ölçüm ve hesap değerleri için sırası ile gün içindeki en yüksek değerleri olan 35,94°C ve 37,30°C değerlerini vermektedir. Daha sonra, üst menfezdeki hava sıcaklığı düşerek gece 24.00'te ölçüm ve hesap değerleri için sırası ile 18,22°C ve 18,43°C olmaktadır. 5 Şubat için yapılan bu değerlendirme grafikte de görüldüğü gibi 4, 6, 7 Şubat tarihlerindeki üst menfez sıcaklıkları için de yapılabilmektedir.



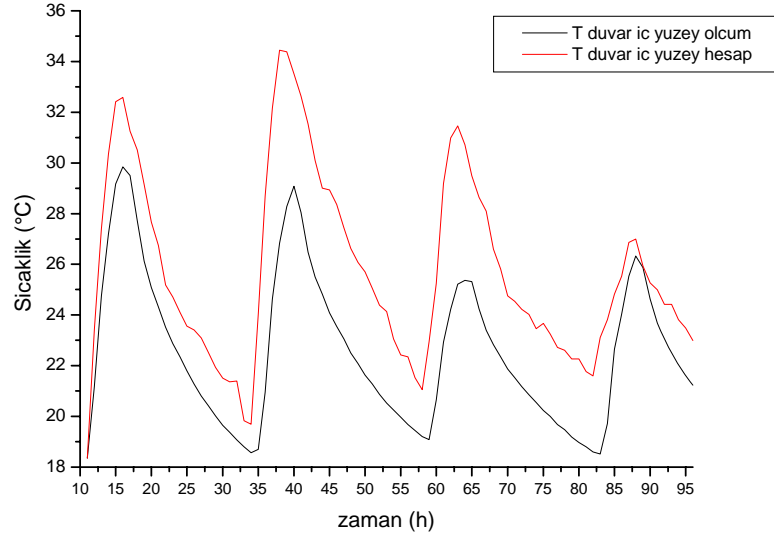
Şekil 5.6 Üst menfezdeki hava sıcaklıklarının saatlik değişiminin ölçüm ve hesaplanan değerleri (4-7 Şubat tarihleri arası).

Şekil 5.7'de 4-7 Şubat tarihleri arasında alt menfezdeki havanın sıcaklığının ölçüm değerleri ve modelleme programından alınan hesap sonuçları saatlik olarak görülmektedir. 5 Şubat günü için grafik irdelendiğinde, gece saat 01.00'de alt menfezdeki ölçüm ve hesap değerleri sırası ile 13,76°C ve 14,48°C'dir. İç ortamdan dış ortama olan ısı kaybı nedeniyle düşen alt menfezdeki sıcaklıklar saat 07.00'de ölçüm ve hesap değerleri için sırasıyla 11,50°C ve 13,32°C değerlerini vermektedir. Güneş ışınımının artması ile birlikte yükselen sıcaklıklar saat 15.00'te ölçüm ve hesap değerleri için sırası ile gün içindeki en yüksek değerleri olan 30,40°C ve 35,86°C değerlerini vermektedir. Daha sonra, alt menfezdeki havanın sıcaklıkları düşerek gece 24.00'te ölçüm ve hesap değerleri için sırası ile 14,66°C ve 17,41°C olmaktadır. 4, 6, 7 Şubat tarihlerindeki üst menfez

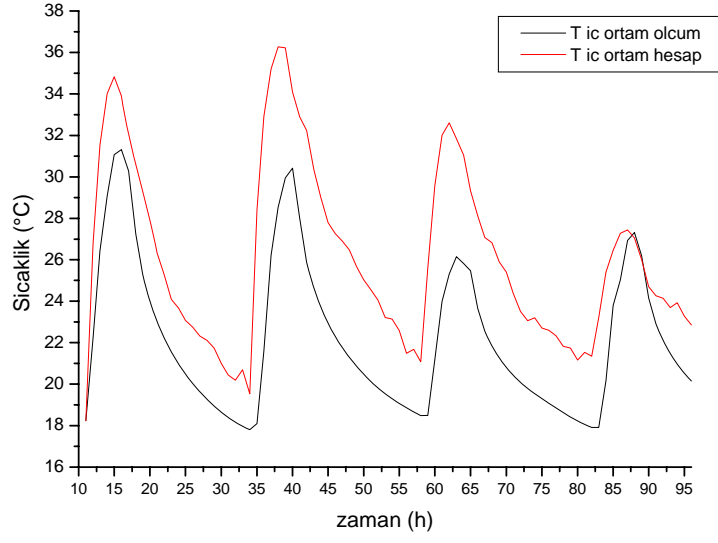
sıcaklıkları için de yapılabilmektedir. Grafikten de okunduğu gibi ölçüm ve hesap değerleri arasındaki paralellik simülasyonun başarılı yapıldığını açık olarak ortaya koymaktadır.



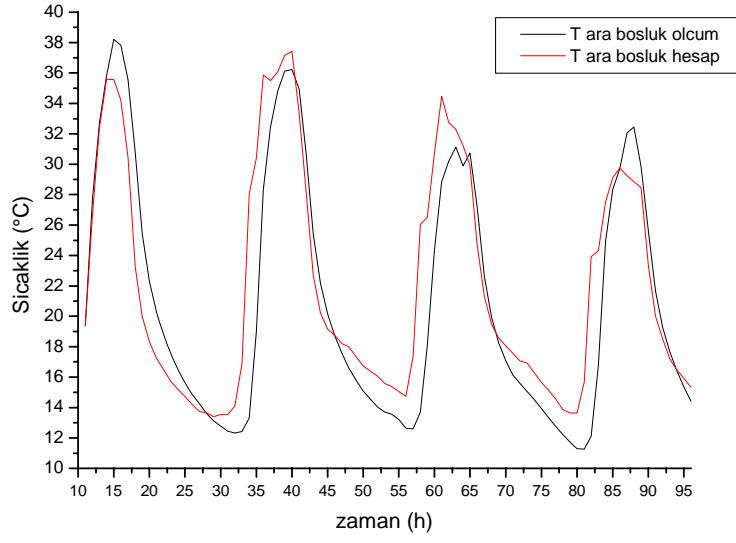
Şekil 5.7 Alt menfezdeki hava sıcaklıklarının saatlik değişiminin ölçüm ve hesaplanan değerleri (4-7 Şubat tarihleri arası).



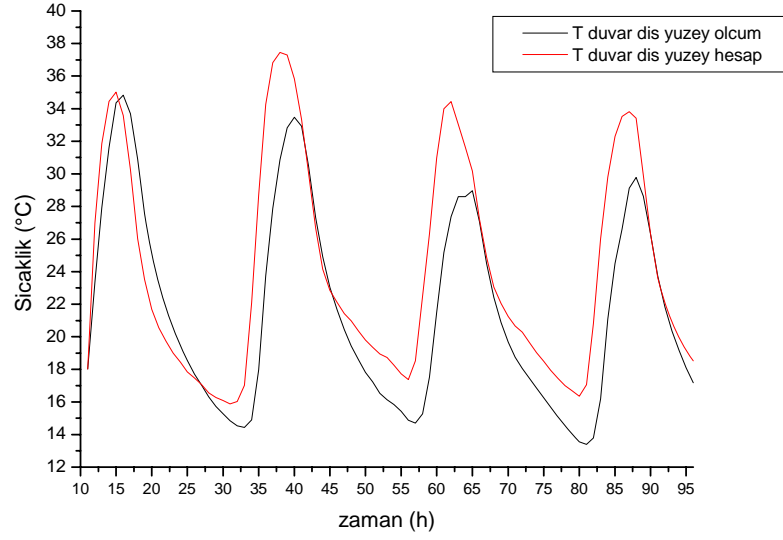
Şekil 5.8 Duvar iç yüzey sıcaklıklarının saatlik değişiminin ölçüm ve hesaplanan değerleri (4-7 Şubat tarihleri arası).



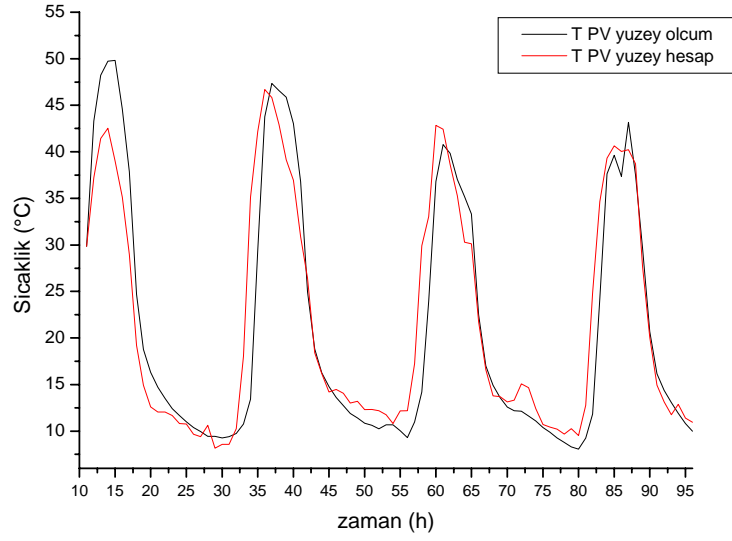
Şekil 5.9 İç ortam sıcaklıklarının saatlik değişiminin ölçüm ve hesaplanan değerleri (4- 7 Şubat tarihleri arası).



Şekil 5.10 Ara boşluk sıcaklıklarının saatlik değişiminin ölçüm ve hesaplanan değerleri (4- 7 Şubat tarihleri arası).



Şekil 5.11 Duvar dış yüzey sıcaklıklarının saatlik değişiminin ölçüm ve hesaplanan değerleri (4-7 Şubat tarihleri arası).



Şekil 5.12 Güneş pilinin yüzey sıcaklıklarının saatlik değişiminin ölçüm ve hesaplanan değerleri (4-7 Şubat tarihleri arası).

Şekil 5.8–5.12’de duvar iç yüzey sıcaklıkları, iç ortam sıcaklıkları, ara boşluk sıcaklıkları, duvar dış yüzey sıcaklıkları, güneş pilinin yüzey sıcaklıklarının ölçüm ve hesap değerleri grafiklere işlenmiş durumdadır. Bu grafikler de Şekil 5.6’daki gibi yorumlanabilmektedir.

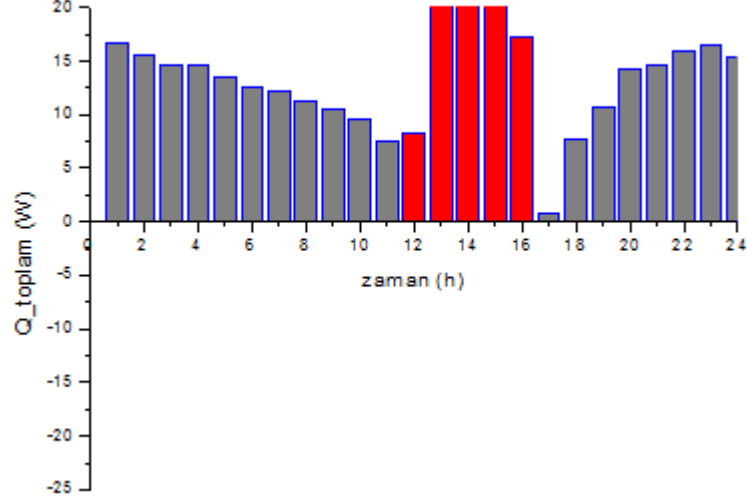
Şekil 5.6–5.12 incelendiğinde ölçülen ve hesaplanan sıcaklık değerlerinin birbirine paralellik gösterdikleri ve çok yakın değerler olduğu görülmektedir. Bu durum, simülasyonun başarılı olduğunu göstermektedir. Simülasyonun başarılı olması, teorik modelin uygulamaya ne kadar yakın olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle sonraki çalışmalarda, mevcut model kullanılarak farklı lokasyon, iklim koşulları, güneş pili çeşitleri, termal kütle örnekleri denenerek mevcut lokasyon için optimizasyona gidilebilecektir.

Odadaki ısı geçişleri saatlik olarak Eşitlik (4.19), (4.20) ve (4.21) ile hesaplanmıştır. 5 Şubat günü için odadaki ısı geçişlerinin saatlik değişimi Şekil 5.13'te görülmektedir. Grafikte, saat 12.00 ile 16.00 arasında kırmızı ile gösterilen kısım, odadan Trombe duvara doğru ısı geçişi olduğunu göstermektedir. 5 Şubat günü menfezler saat 11.00'de açılıp 16.00'da kapatılmıştır. Gece saat 01.00'den saat 11.00'e kadar ısı geçişi duvardan oda içine doğru gerçekleşmektedir. Sistem, simülasyonun yapıldığı 4–7 Şubat tarihleri öncesinde de çalıştırıldığı için düşük başlangıç sıcaklıklarına sahip değildir. Bu nedenle 4 Şubat günü duvarda depolanmış olan ısı, 5 Şubat günü saat 01.00'den 11.00'e kadar azalarak da olsa odaya doğru ısı transferi gerçekleşmesini sağlamaktadır. Bunun nedeni, duvarın odaya bakan yüzey sıcaklığının iç ortam sıcaklığından fazla olmasıdır.

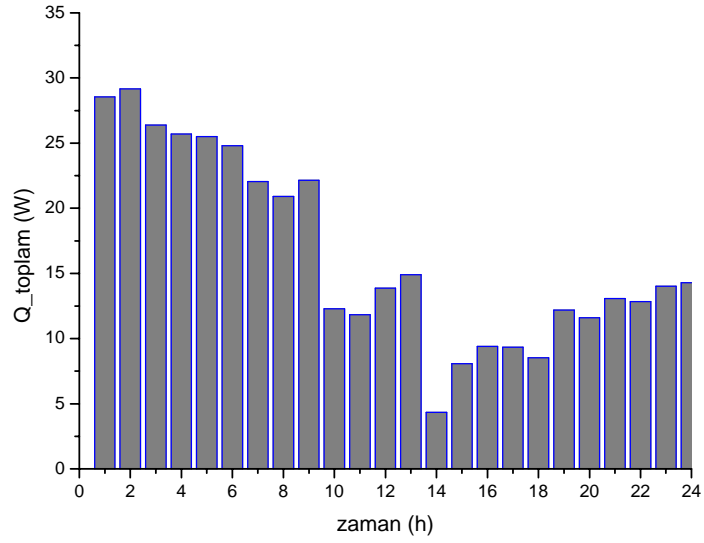
Saat 11.00'de menfezlerin açılması ile birlikte ara boşluktan iç ortama doğru konveksiyonla ısı geçişi gerçekleşmekte ve odanın iç ortam sıcaklığı aniden yükselerek duvarın iç ortama bakan yüzey sıcaklığından daha yüksek değerlere çıkmaktadır. Bu nedenle, menfezlerin açık olduğu süre boyunca iç ortamdan duvara ısı kaybı gerçekleşmektedir ve grafikte de görüldüğü gibi toplam ısı miktarı negatif değerler almaktadır. Saat 16.00'da menfezlerin kapatılması sonucunda 16.00–24.00 saatleri arasında duvardan iç ortama ısı geçişi gerçekleşmektedir.

Şekil 5.14'te 28 Ocak günü için odanın kazandığı ısı miktarının saatlik değişimi verilmektedir. Hava kapalı olduğundan menfezler tüm gün kapalı tutulmuştur. Saat 01.00'den 09.00'a kadar duvarın iç ortama bakan yüzeyinin sıcaklığı ile iç ortam sıcaklığı arasındaki fark fazla olduğundan odanın ısı kazancı fazla olmaktadır. Saat 10.00'da bu sıcaklık farkı azaldığından duvardan iç ortama olan ısı kazancı azalmaktadır. Saat 14.00'ten 24.00'e kadar duvarın iç ortama

bakan yüzeyindeki sıcaklığın artması iç ortamın ısı kazancında artışa sebep olmaktadır. Bu ısı kazancı, ek yapma ısıtma sistemi kullanılmadan iç ortam sıcaklıklarını 5 Şubat gününde 17,80°C ile 30,41°C arasında, 28 Ocak gününde ise 15,32°C ile 16,92°C arasında tutulmasını sağlamaktadır.



Şekil 5.13 Duvar yüzeyinden iç ortama olan ısı geçişinin saatlik değişimi (5 Şubat günü için).



Şekil 5.14 Duvar yüzeyinden iç ortama olan ısı geçişinin saatlik değişimi (28 Ocak günü için).

Sistemin 5 Şubat günü için 24 saatlik sıcaklık ve hava hareketi hızı değişiminin CFX'te modellenmiş 2 boyutlu gösterimi Ekler kısmında verilmektedir.

Bu model, Türkiye ve Dünya'nın herhangi bir yerinde, BEPV/T sistem uygulamasında kullanılabilir. Konutlar, havaalanları, yüksek binalar, kısaca güneş pillerinin gölgelenmeden güneş ışınımını rahatlıkla alabileceği tüm binalarda kullanılması mümkün olacaktır.

## 6. SONUÇ

Model olarak kullanılan BEPV/T hibrit sistemin avantajı, PV modül ve yutucu yüzey tarafından oluşturulan ısı, bu iki bileşen arasındaki hava boşluğuna aktarılarak PV modülün soğumasını ve dolayısıyla elektriksel veriminin artmasını sağlamaktadır. Verilen yüzeydeki potansiyel ısı üretimi elektrik performansından çok daha yüksektir. PV ve termal güneş kolektörünün birlikte kullanımı sıcaklık uyuşması ile son bulur. PV, yüksek verimlilik için düşük sıcaklığa ihtiyaç duyarken; termal güneş kolektörü yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyar. Mevcut teknolojilerle, BEPV/T bileşimi, PV sistem ve termal kolektörün tek başına kullanıldığı sistemden daha düşük verimliliğe sahiptir ve BEPV/T kombinasyonu daha pahalıdır. Buna rağmen, estetik, gelecekteki maliyet azalmaları (üretim ve kurulum) ve piyasa/ tüketici ihtiyaçları açısından avantajlı olacağı düşünülmektedir.

Ülkemiz güneş enerjisi potansiyeli bakımından şanslı bir ülkedir. Ülkemizde bölgelere göre ortalama yıllık toplam güneş enerjisi 1311 kWh/m<sup>2</sup>yıl ve yıllık toplam güneşlenme süresi ise 2640 saattir. Mevcut potansiyelin değerlendirilmesi durumunda, enerjide dışa bağımlılık büyük oranda azalacaktır ancak güneş enerjili sistemlerin genellikle ilk kurulum maliyetleri oldukça yüksektir. Güneş pilleri ile elektrik üretimi pahalı olması nedeni ile henüz kullanılmamaktadır. Binalarda güneş enerjisinden, sıcak suyun yanı sıra elektriğin de üretilmesinin yaygınlaşması, fosil enerji kaynaklarına gereksinimi azaltacağından çevre kirliliğini önemli ölçüde düşürecektir. Ülke ekonomisine ve çevreye katkısı uzun vadede olumlu olacaktır. Bu iki dönüştürücünün bir arada kullanılmasının maliyeti düşürmesi, sistemin üretimini ve kullanımını yaygınlaştıracaktır.

Toplam enerji tüketimi içinde konut sektörünün enerji tüketimi %33'tür. Sektörel bazda düşünüldüğünde, konutlar enerji tüketiminde büyük paya sahiptir. Bu bağlamda konutlarda fosil kaynaklı enerji tüketiminin azaltılması yönünde yapılacak çalışmalar ülke ekonomisine önemli katkıda bulunacak bağlı çevre sorunlarını azaltacaktır. BEPV/T güneş duvarı, yapılara sonradan eklenebilme özelliği ile mevcut yapıların da iyileştirilmesine olanak vermektedir. Projenin bir prototip olması ve yaygınlaştırılması hedeflenmektedir.

Sistem 01.01–30.04 tarihleri arasında 4 ay boyunca çalıştırılmış ve ölçüm sonuçları kaydedilmiştir. Sistem kararlı hale geldikten sonra 4–7 Şubat tarihlerindeki ölçüm sonuçları modelin CFX’te oluşturulması için kullanılmıştır.

Teorik modelin geçerliliği bu çalışmada kurgulanmış olan deney düzeneği ile kanıtlanmıştır. Deneysel sonuçlar, teorik modelin geliştirilip bir model oluşturulmasını sağlamıştır. BEPV/T sistem modelinin enerji analizi periyodik rejimde 04–07 Şubat tarihleri arasında 4 gün için yapılmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçlarının ölçüm sonuçları ile örtüşmesi modelin doğruluğunu ve uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır. Geliştirilen simülasyon modeli kullanılarak farklı lokasyon, iklimsel çevre değişkenleri, güneş pili çeşitleri, termal kütle örnekleri, ara boşluk kalınlıkları ve menfez açıklıklarının denenebilmesi ve sistem inşa edilmeden önce optimizasyon yapılması sağlanacaktır. Sistemde kullanılan yarı-geçirgen güneş pilinin geçirgenliğinin %10 olduğu, PV yüzeyinde ve duvarın ara boşluğa bakan yüzeyinde ışınım ölçümleri yapılarak tespit edilmiştir. Yarı-geçirgen güneş pilinin elektriksel verimi %4,5 olup, elektriksel verimin sıcaklığa bağlı değişimi Bulgular ve Tartışma kısmında yorumlanıp değerlendirilmiştir. Sistemin 05 Şubat tarihindeki ortalama termal verimi %20,3 olarak bulunmuştur. 5 Şubat ve 28 Ocak günlerinde duvar ve iç ortam arasındaki ısı geçişleri, ek yapma ısıtma sistemi kullanılmadan iç ortam sıcaklıklarını konfor sıcaklığının üzerinde veya bu sıcaklığa yakın değerlerde tutulmasını sağlamaktadır.

Literatürdeki örnekler genellikle seraların çatısına, binaların çatılarına veya bina cephelerine uygulanmış ve verim hesaplarındaki çözümlenmeleri sabit rejimde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, yarı-geçirgen güneş pilinin Trombe duvarlı sistemin dış kabuğunda kullanıldığı BEPV/T sistemin periyodik rejimde 2 boyutlu simülasyonu ve enerji analizi yapılmıştır. BEPV/T sistemde yarı-geçirgen güneş pili kullanılması normal güneş pili uygulamasına kıyasla termal kütle üzerine düşen ışınımın artmasını sağlamakta, dolayısı ile bu hibrit sistemin enerji kazançları üzerinde olumlu etkide bulunmaktadır. Yarı-geçirgen güneş pilinin arka yüzeyinin iç mekâna açılan menfezler vasıtası ile havalandırılması ise sıcaklığının düşmesine, buna bağlı olarak elektriksel veriminin artmasını sağlamaktadır.

Bu sistem, yeni inşa edilecek binalara uygulanabileceği gibi mevcut binaların iyileştirilmesinde de kullanılabilmesi açısından önem taşımaktadır.

Sistemin kaynak olarak temiz enerji kaynaklarından güneş enerjisini kullanıyor olması ısıtma ve elektrik üretimi için fosil yakıt kullanımının azaltılması ile sürdürülebilirliğin sağlanması açısından önemli bir avantaj olacağı düşünülmektedir.



## 7. ÖNERİLER

Güneş enerjisinden BEPV/T hibrit sistemler vasıtası ile yararlanılmasında sorun güneş pili sıcaklığının yükselmesi ve buna bağlı olarak da sistemin elektriksel veriminin düşmesidir. Bu nedenle, ileriki çalışmalarda sıcaklık artışını en aza indiren ve buna bağlı olarak verimliliği arttıran araştırma ve çalışmalara yoğunlaşılması uygun olacaktır.

Bu çalışmalar içerisinde öncelikle, ara boşluk mesafesinin ve hava akış hızının değişiminin performansa etkisinin incelenmesi gerekmektedir. Bunun nedeni güneş pilinin verimin artırmak ve arka yüzeyinde oluşan sıcaklık artışını kontrol etmek amacıyla hava akış hızını ve ara boşluk mesafesini değiştirerek en uygun mesafe ve hız bulunabilir. Aynı zamanda sistem doğal dolaşım yerine kontrollü zorlanmış dolaşım olarak da dikkate alınabilir.

Bu çalışmada, sistemin ısıtma dönemindeki performansı değerlendirilmiştir. PV modülün bulunduğu cidarda dış ortama açılan menfezlerin yapılması ve sistemin bu menfezler ile havalandırılması sonucu elektriksel ve termal verimdeki değişimler de incelenebilir.

Oluşturulan bu simülasyon modeli sayesinde sistem inşa edilmeden, farklı yerleşim yerlerinde, farklı ara boşluk kalınlıkları için, farklı duvar tiplerinde, farklı menfez açıklıkları için ve farklı özellikteki güneş pilleri için denenip o lokasyon için optimizasyona gidilmesi sağlanabilir.



## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Agrawal, B. and Tiwari, G.N.**, 2009, Optimizing the energy and exergy of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) systems under cold climatic conditions , *Applied Energy*, 87(2), 417-426p.
- Anderson, T.N., Duke, M., Morrison G.L. and Carson, J.K.**, 2009, Performance of a building integrated photovoltaic/thermal (BIPVT) solar collector, *Solar Energy*, 83, 445–455p.
- Bergene, T. and Lovvik, O.M.**, 1995, Model calculations on a flat plate solar heat collector with integrated solar cells, *Solar Energy*, 55(6), 453-462p.
- Bloem, J.J.**, 2008, Evaluation of a PV-integrated building application in a well-controlled outdoor test environment, *Building and Environment*, 43, 205–216p.
- Cheng, C.L., Jimenez, C.S.S. and Lee, M.**, 2009, Research of BIPV optimal tilted angle, use of latitude concept for South orientated plans, *Renewable Energy*, 34, 1644–1650p.
- Chow, T.T., Chan, A.L.S., Fong K.F., Lin Z., Heb, W. and Ji, J.**, 2009, Annual performance of building-integrated photovoltaic/water-heating system for warm climate application, *Applied Energy*, 86 , 689–696p.
- Chow, T.T.**, 2010, A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology, *Applied Energy*, 87, 365–379p.
- Coventry, J.S.**, 2005, Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector, *Solar Energy*, 78(2), 211-222p.
- Dubey, S., Sandhu, G.S. and Tiwari, G.N.**, 2009, Analytical expression for electrical efficiency of PV/T hybrid air collector, *Applied Energy*, 86, 697–705p.
- Erkaya, K. ve Çolak, M.**, 1998, Fotovoltaik-fototermik Dönüştürücülerde Verim Optimizasyonu, Doktora tezi, E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Güneş Enerjisi A.B.D., İzmir
- Florides, G.A., Tassou, S.A., Kalogirou, S.A., and Wrobel, L.C.**, 2001, Evolution of domestic dwellings in Cyprus and energy analysis, *Renewable Energy*, 23, 219–234p.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Florschuetz, L. W.**, 1979, Extension of the Hottel–Whillier model to the analysis of combined photovoltaic / thermal flat plate collectors. *Solar Energy*, 22, 361–366p.
- Fujisawa, T. and Tani, T.**, 1997, Annual Exergy Evaluation on Photovoltaic-Thermal Hybrid Collector, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 47, 135-148p.
- Fung, T.Y.Y. and Yang, H.**, 2008, Study on thermal performance of semi-transparent building-integrated photovoltaic glazings, *Energy and Buildings*, 40, 341–350p.
- Garg, H.P., and Adhikari, R.S.**, 1997, Conventional hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) air heating collectors: steady-state simulation, *Renewable Energy*, 11(3), 363-385p.
- Garg, H.P., and Adhikari, R.S.**, 1999, System performance studies on a photovoltaic/thermal (pv/t) air heating collector, *Renewable Energy*, 16, 725-730p.
- Güneş, N.Ç.**, 2009, Gıda Kurutma Sistemlerinin Ekserji Analizi, Güneş Enerjisi Enstitüsü Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi, 76s.
- He, W., Chow, T., Ji, J., Lu, J., Pei, G. and Chan, L.**, 2006, Hybrid photovoltaic and thermal solar-collector designed for natural circulation of water, *Applied Energy*, 83, 199–210p.
- Hegazy, A.A.**, 2000, Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors, *Energy Conversion & Management*, 41, 861-881p.
- Huang, B.J., Lin, T.H., Hung, W.C. and Sun, F.S.**, 2001, Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems, *Solar Energy*, 70(5), 443-448p.
- Infield, D., Mei, L. and Eicker, U.**, 2004, Thermal performance estimation for ventilated PV facades, *Solar Energy*, 76, 93–98p.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Ji, J., Hua, Y., Gang, P., Bin, P. and Wei, H.,** 2007a, Study of PV-Trombe wall assisted with DC fan, *Building and Environment*, 42, 3529–3539p.
- Ji, J., Hua, Y., Gang, P. and Jianping, L.,** 2007b, Study of PV-Trombe wall installed in a fenestrated room with heat storage, *Applied Thermal Engineering*, 27, 1507–1515p.
- Jianga, B., Ji, J., Yi, H.,** 2008, The influence of PV coverage ratio on thermal and electrical performance of photovoltaic-Trombe wall, *Renewable Energy*, 33, 2491–2498p.
- Joshi A.S., Tiwari, A., Tiwari G.N., Dincer I. and Reddy, B.V.,** 2009, Performance evaluation of a hybrid photovoltaic thermal (PV/T) (glass-to-glass) system, *International Journal of Thermal Sciences*, 48, 154–16p.
- Florides, G.A., Tassou, S.A., Kalogirou, S.A., Wrobel, L.C.,** 2001, Evolution of domestic dwellings in Cyprus and energy analysis, *Renewable Energy*, 23, 219–234p.
- Kalogirou, S.A. and Tripanagnostopoulos, Y.,** 2007, Industrial application of PV/T solar energy systems, *Applied Thermal Engineering*, 27, 1259–1270p.
- Krauter, S., Araujo, R.G., Schroer, S., Hanitsch, R., Salhi, M.J., Triebel, C. and Lemoine, R.,** 1999, Combined photovoltaic and solar thermal systems for facade integration and building insulation, *Solar Energy*, 67(4-5), 239-248p.
- Lalovic, B.,** 1986, A hybrid amorphous silicon photovoltaic and thermal solar collector, *Solar Cells*, 19, 131–138p.
- Othman, M.Y.H., Yatima, B., Sopianb, K. and Bakar, M.N.A,** 2005, Performance analysis of a double-pass photovoltaic/thermal (PV/T) solar collector with CPC and fins, *Renewable Energy*, 30, 2005–2017p.
- Park, K.E, Kang, G.H., Kim, H.I., Yu, G.J., Kim, J.T.,** 2009, Analysis of thermal and electrical performance of semi-transparent photovoltaic (PV) module, *Energy*, in press.
- Petela, R.,** 2003, Exergy of undiluted thermal radiation, *Solar Energy*, 74, 469–488p.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

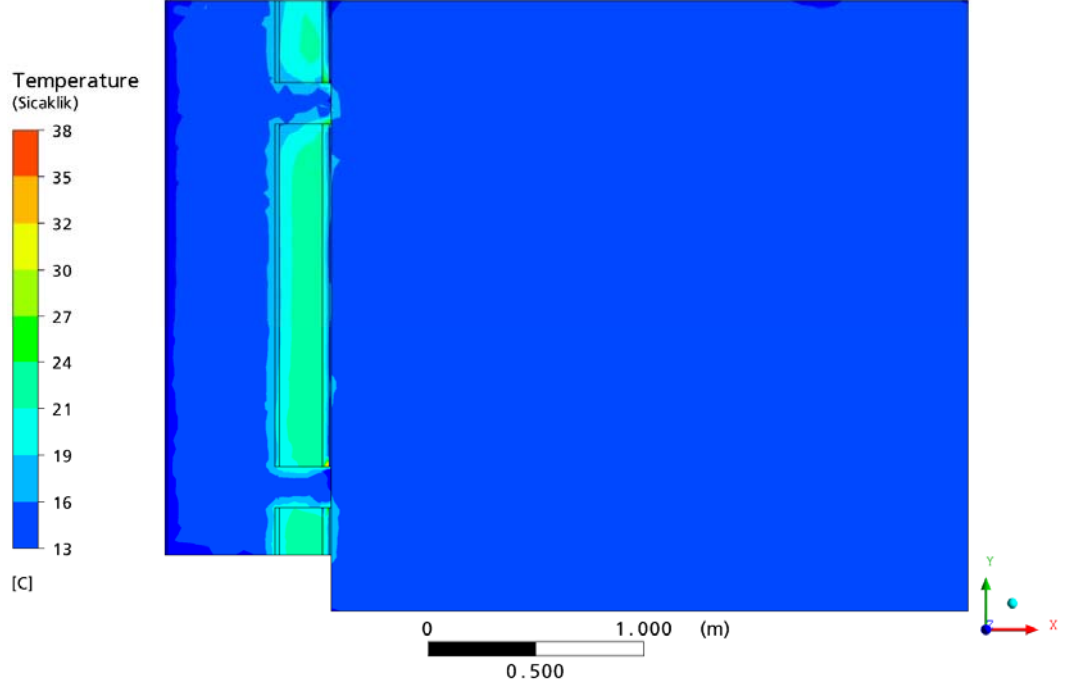
- Petipierre, A.B.**, 2007, CFD Simulations of Pressure Loss in Pipes with Different Geometries, MScThesis, Lulea University of Technology, MSc Programmes in Engineering, Mechanical Engineering, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, *Division of Fluid Mechanics*, 79p.
- Raghuraman, P.**, 1981, Analytical predictions of liquid and air photovoltaic / thermal flat plate collector performance, *J. Solar Energy Engineering*, 103, 291–298p.
- Rüther, R. and Braun, P.**, 2009, Energetic contribution potential of building-integrated photovoltaics on airports in warm climates, *Solar Energy*, 83 , 1923–1931p.
- Rosell, J.I., Vallverdú, X., Lechón, M.A. and Ibáñez, M.**, 2005, Design and simulation of a low concentrating photovoltaic/thermal system, *Energy Conversion and Management*, 46(18-19), 3034-3046p.
- Sandnes, B. and Rekstad, J.**, 2002, A photovoltaic /thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate, experimental study and analytical model, *Solar Energy*, 72(1), 63-73p.
- Sopian, K., Yigit, K.S., Liu, H.T., Kakaç, S. and Veziroglu, T.N.**, 2009, Performance analysis of photovoltaic thermal air heaters, *Energy Conversion and Management*, 1996, 1657-1670p.
- Skoplaki, E. and Palyvos, J.A.**, 2009, On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations, *Solar Energy*, 83, 614–624p.
- Tiwari, A. and Sodha, M.S.**, 2006, Performance evaluation of solar PV/T system: An experimental validation, *Solar Energy*, 80, 751–759p.
- Tiwari, A., Dubey, S., Sandhu, G.S., Sodha, M.S. and Anwar, S.I.**, 2009, Exergy analysis of integrated photovoltaic thermal solar water heater under constant flow rate and constant collection temperature modes, *Applied Energy* 86, 2592–2597p.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

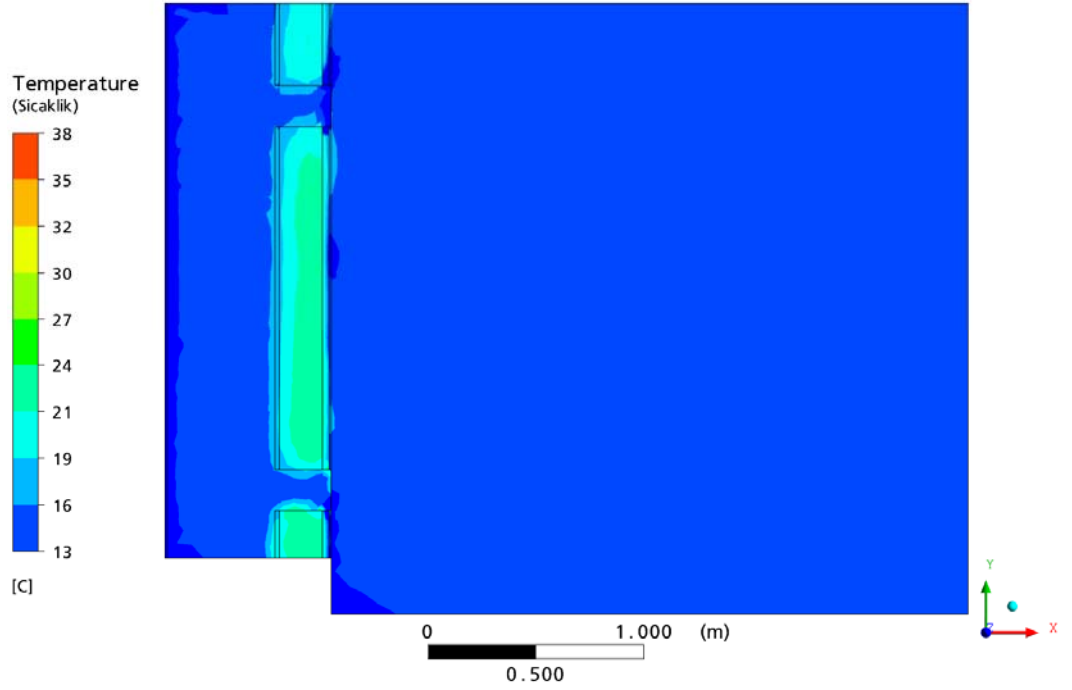
- Tjiptoprodjo, R.C.**, 2005, On a Finite Element Approach to Modeling of Piezoelectric Element Driven Compliant Mechanisms, College of Graduate Studies and Research in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in the Department of Mechanical Engineering University of Saskatchewan Saskatoon, 31p.
- Triapanognostopoulos, Y., Nousia, Th., Souliotis, M. and Yianoulis, P.**, 2002, Hybrid photovoltaic/ thermal solar systems, *Solar Energy*, 72(3), 217-234p.
- Trinuruk, P., Sorapipatana, C., Chenvidhya D.**, 2009, Estimating operating cell temperature of BIPV modules in Thailand, *Renewable Energy*, 34, 2515–2523p.
- Wong, P.W., Shimodab, Y., Nonakaa, M., Inouea, M. and Mizunob, M.**, 2008, Semi-transparent PV: Thermal performance, power generation, daylight modelling and energy saving potential in a residential application, *Renewable Energy*, 33, 1024–1036p.
- Yun, G. Y., McEvoy, M. and Steemers, K.**, 2007, Design and overall energy performance of a ventilated photovoltaic façade *Solar Energy*, 81, 383–394p.
- Zakharchenko, R., Licea-Jiménez, L., Pérez-García, S.A., Vorobiev, P., Dehesa-Carrasco, U., Pérez-Robles, J.F., González-Hernández J., and Vorobiev Yu.**, 2004, Photovoltaic solar panel for a hybrid PV/thermal system, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 82(1-2), 253-261p.
- Zondag, H.A., de Vries, D.W., van Helden, W.G.J., van Zolingen, R.J.C. and van Steenhowen, A.A.**, 2002, The thermal and electrical yield of a PV/Thermal collector, *Solar Energy*, 72(2), 113-128p.
- <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2009/12/the-next-solar-frontier-producing-more-energy-with-hybrid-pvthermal-systems> (Erişim tarihi: 3 Ocak 2010)
- <http://www.scribd.com/doc/14740454/SolarWall-PVT-Case-Study-John-Molson-School-of-Business-at-Concordia-University-PV-solar-air-heating-system> (Erişim tarihi: 5 Ocak 2010)

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

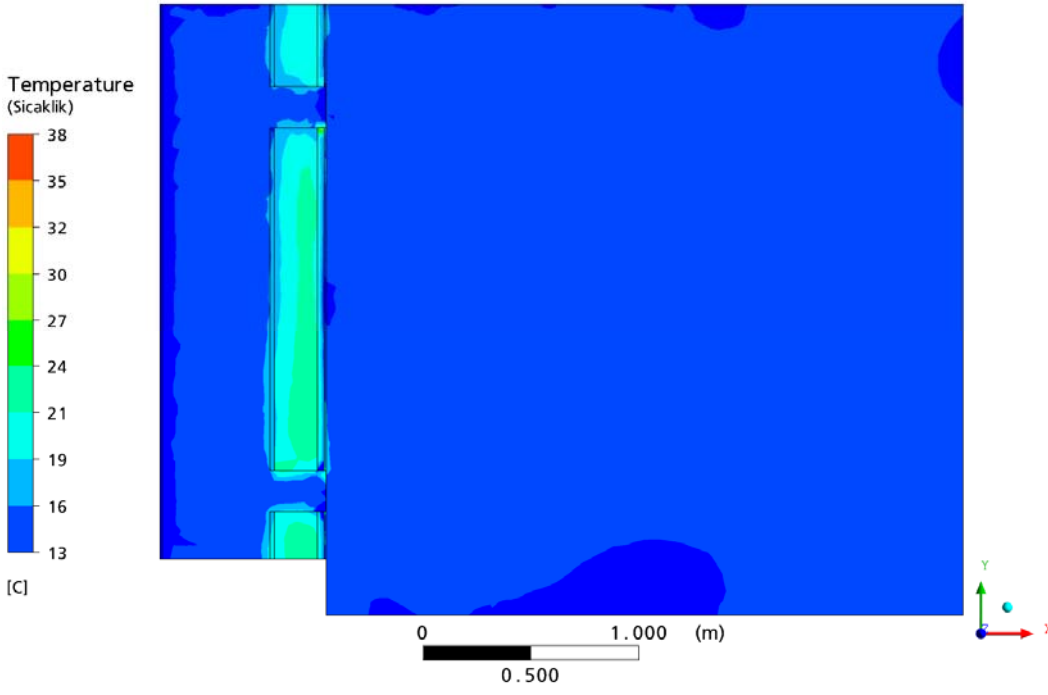
<http://www.schottsolar.com/global/products/building-integrated> (Erişim tarihi: 2 Ocak 2010)

**EKLER****Ek 1 Test Odasındaki Sıcaklık Dağılımı**

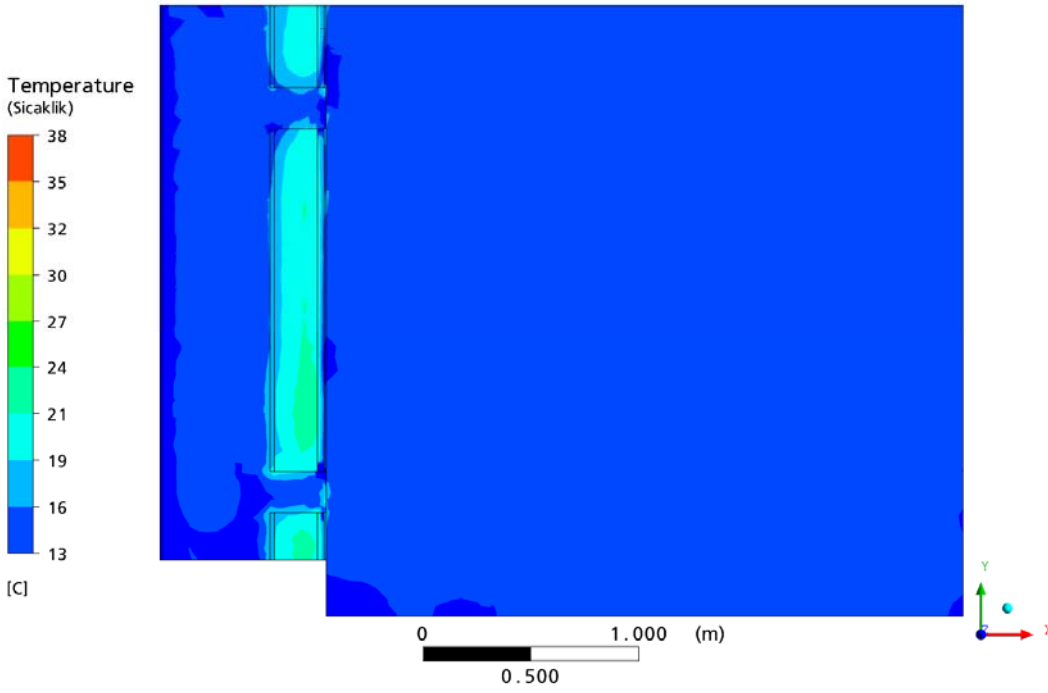
Şekil A.1 5 Şubat 2008, saat 01.00'deki, test odasındaki sıcaklık dağılımı.



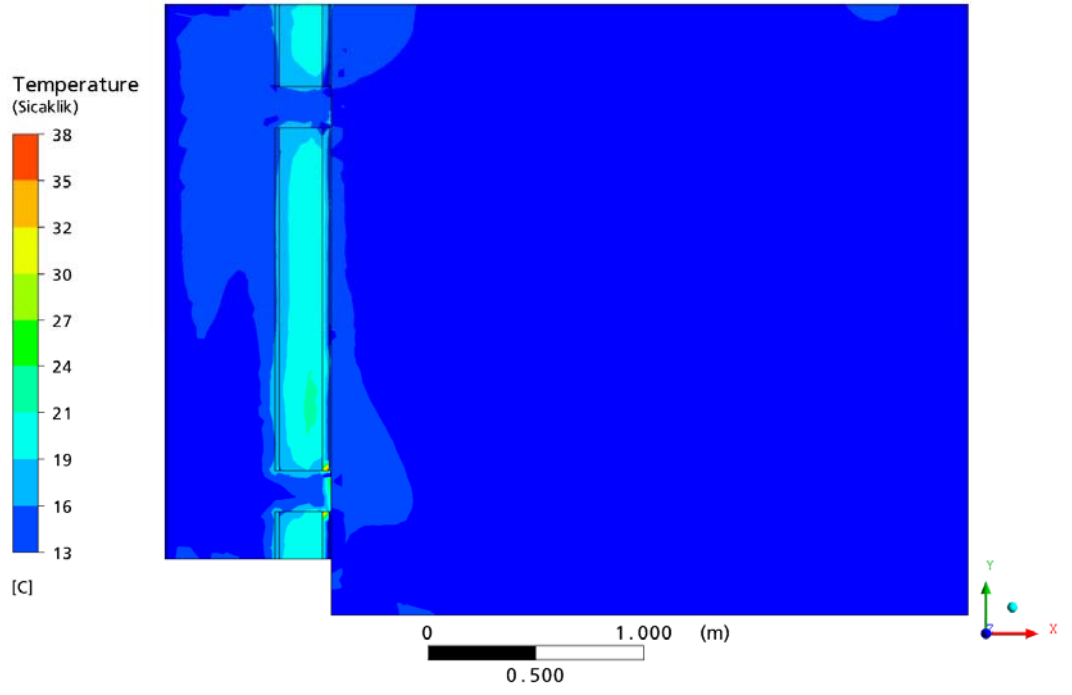
Şekil A.2 5 Şubat 2008, saat 02.00'deki, test odasındaki sıcaklık dağılımı.



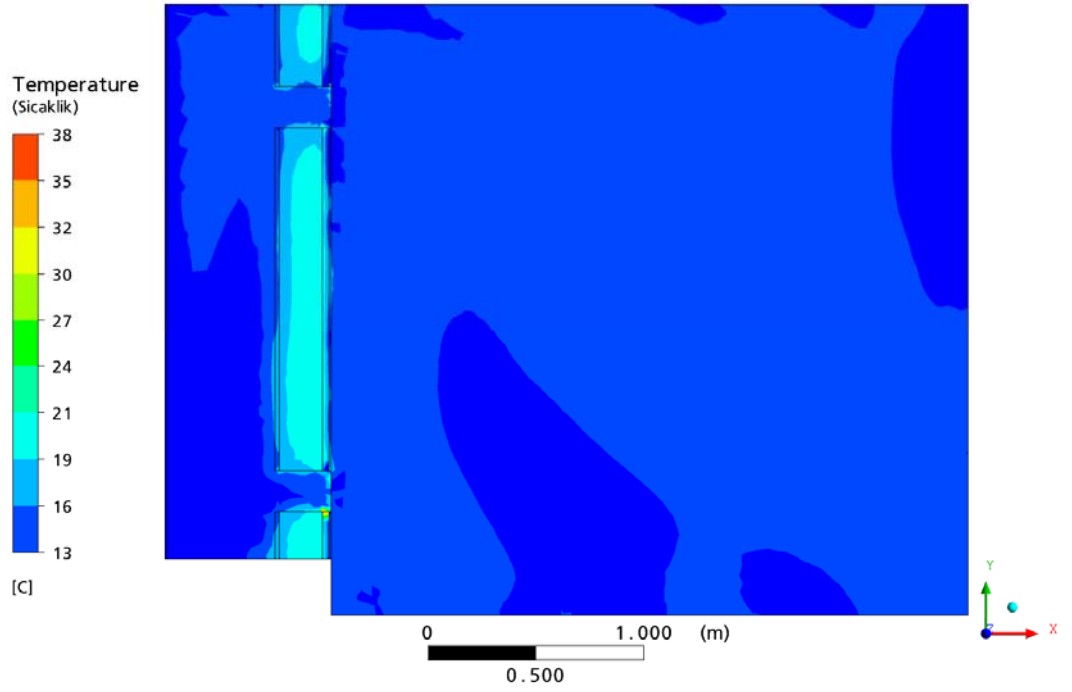
Şekil A.3 5 Şubat 2008, saat 03.00'teki, test odasındaki sıcaklık dağılımı.



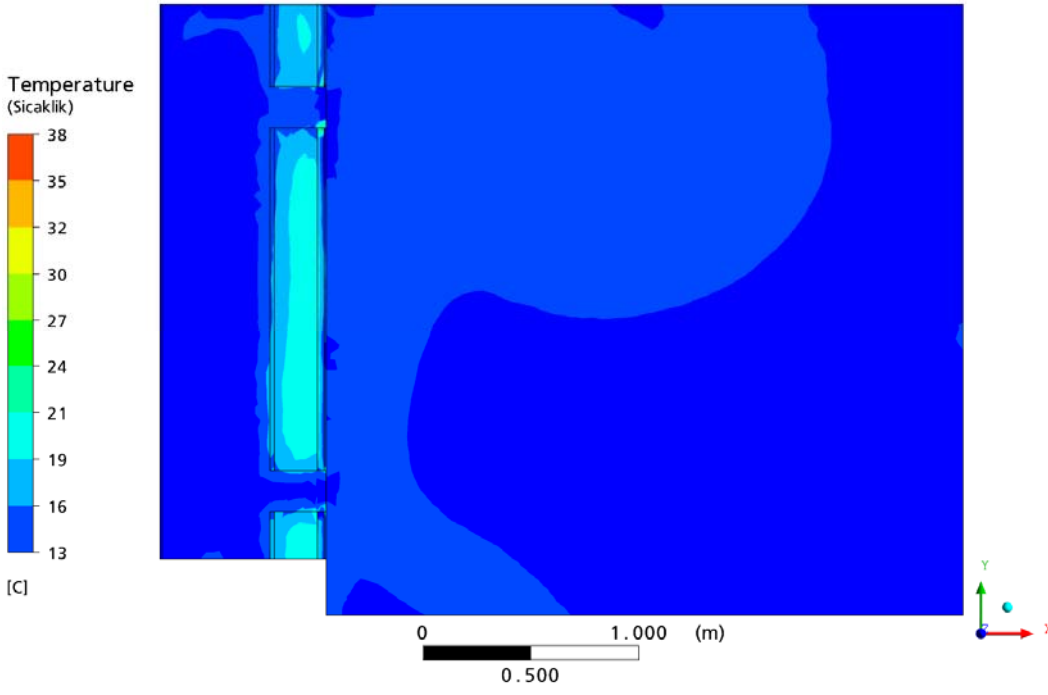
Şekil A.4 5 Şubat 2008, saat 04.00'teki, test odasındaki sıcaklık dağılımı.



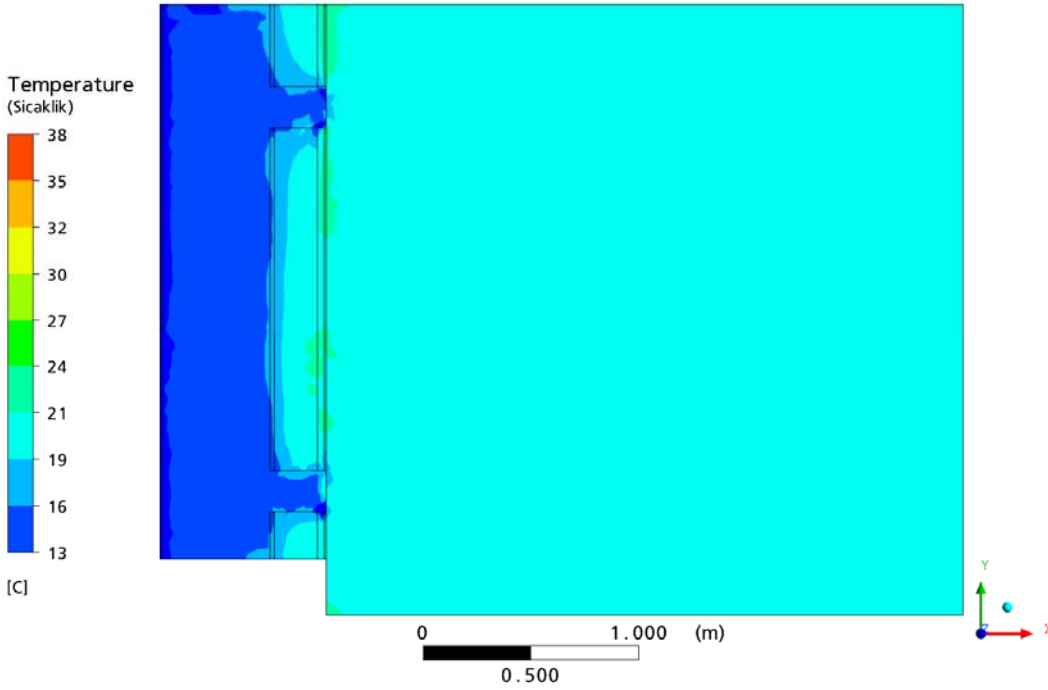
Şekil A.5 5 Şubat 2008, saat 05.00'teki, test odasındaki sıcaklık dağılımı.



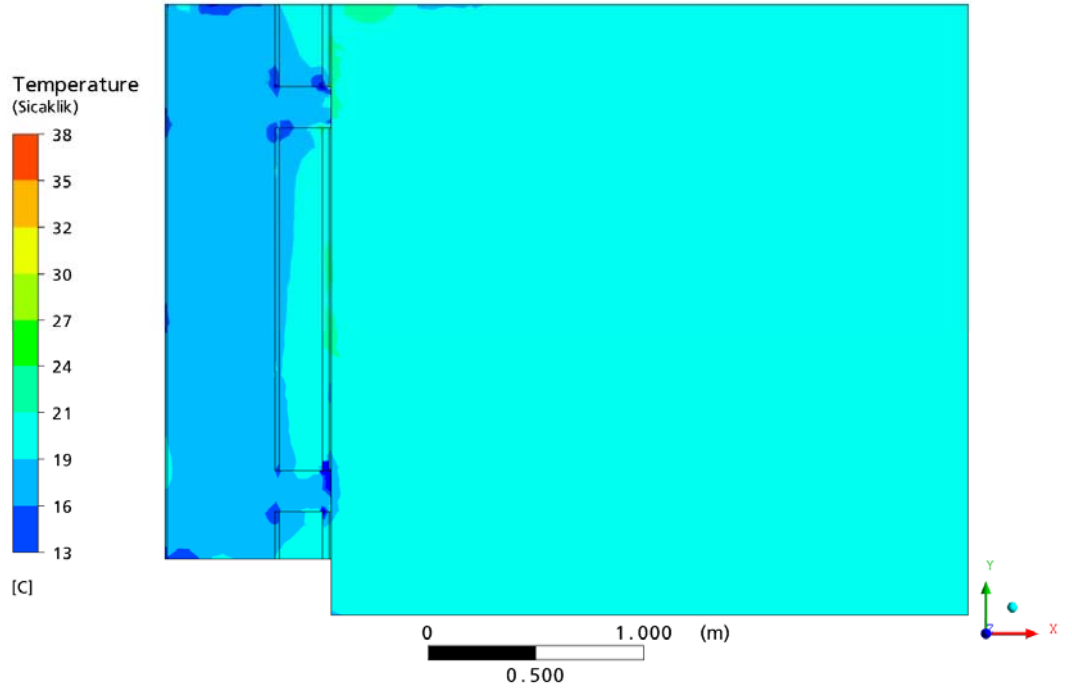
Şekil A.6 5 Şubat 2008, saat 06.00'daki, test odasındaki sıcaklık dağılımı.



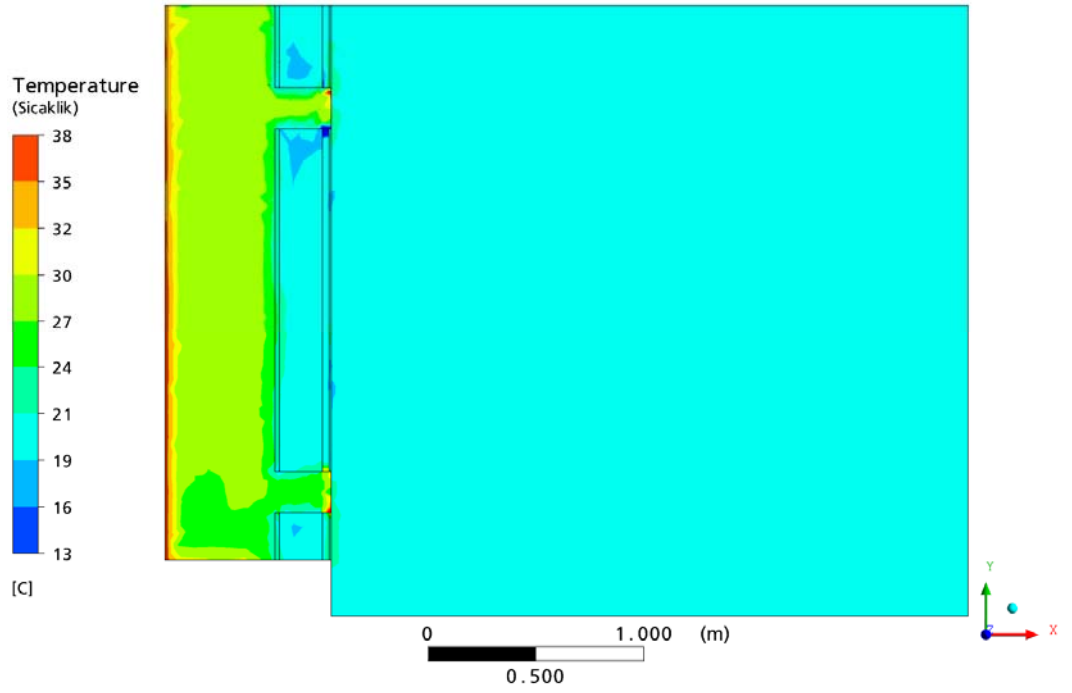
Şekil A.7 5 Şubat 2008, saat 07.00'deki, test odasındaki sıcaklık dağılımı.



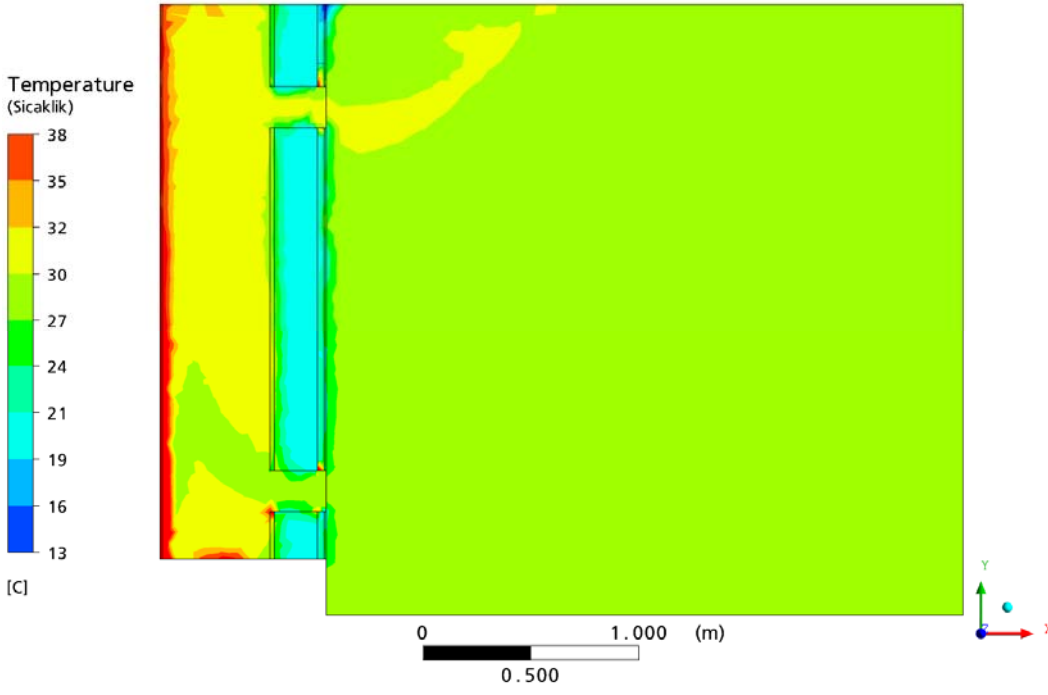
Şekil A.8 5 Şubat 2008, saat 08.00'deki, test odasındaki sıcaklık dağılımı.



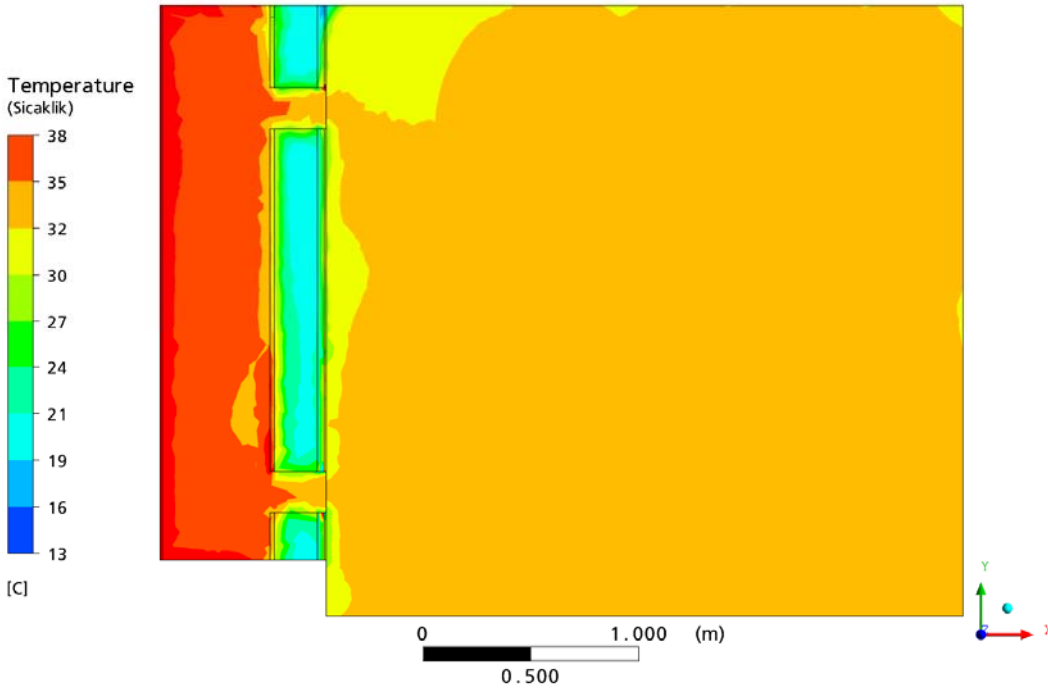
Şekil A.9 5 Şubat 2008, saat 09.00'daki, test odasındaki sıcaklık dağılımı.



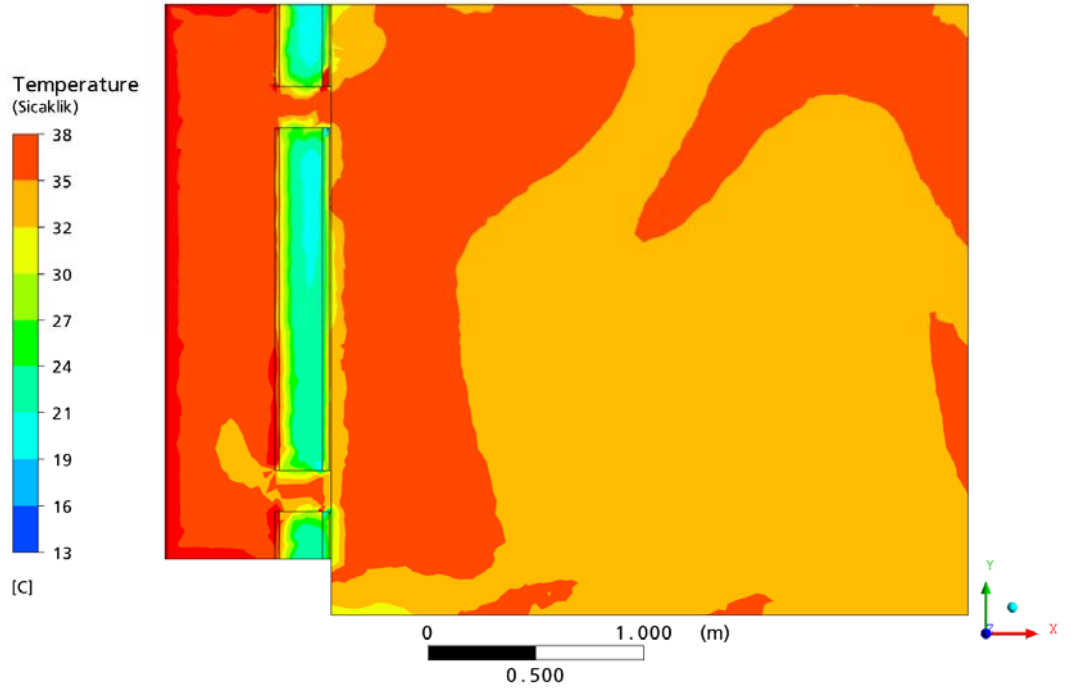
Şekil A.10 5 Şubat 2008, saat 10.00'daki, test odasındaki sıcaklık dağılımı.



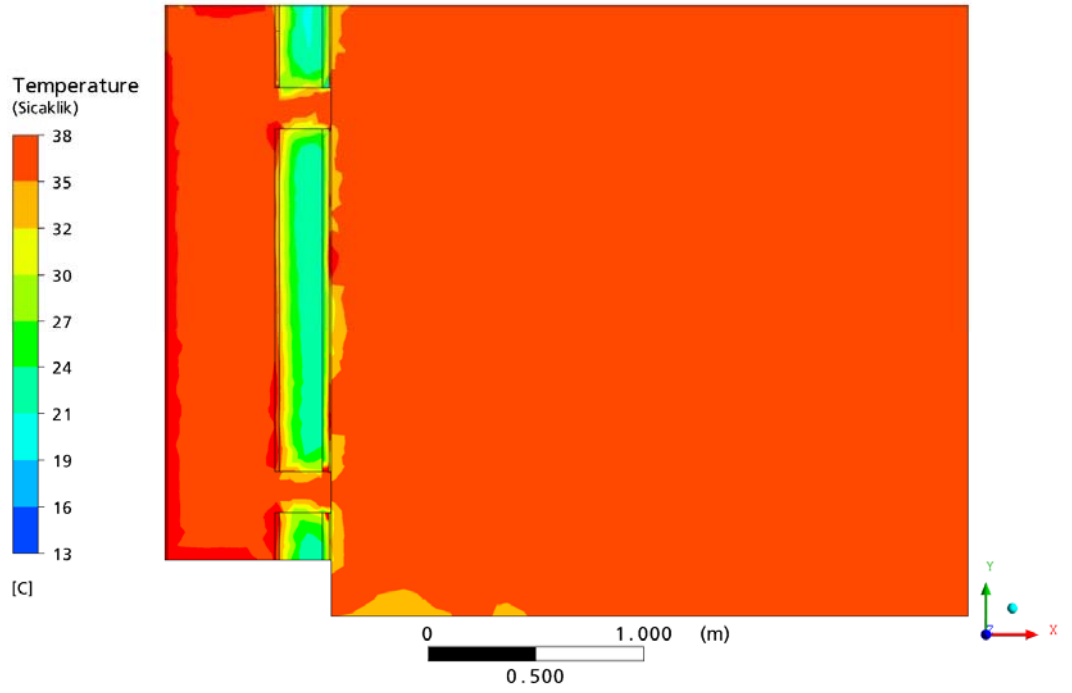
Şekil A.11 5 Şubat 2008, saat 11.00'deki, test odasındaki sıcaklık dağılımı.



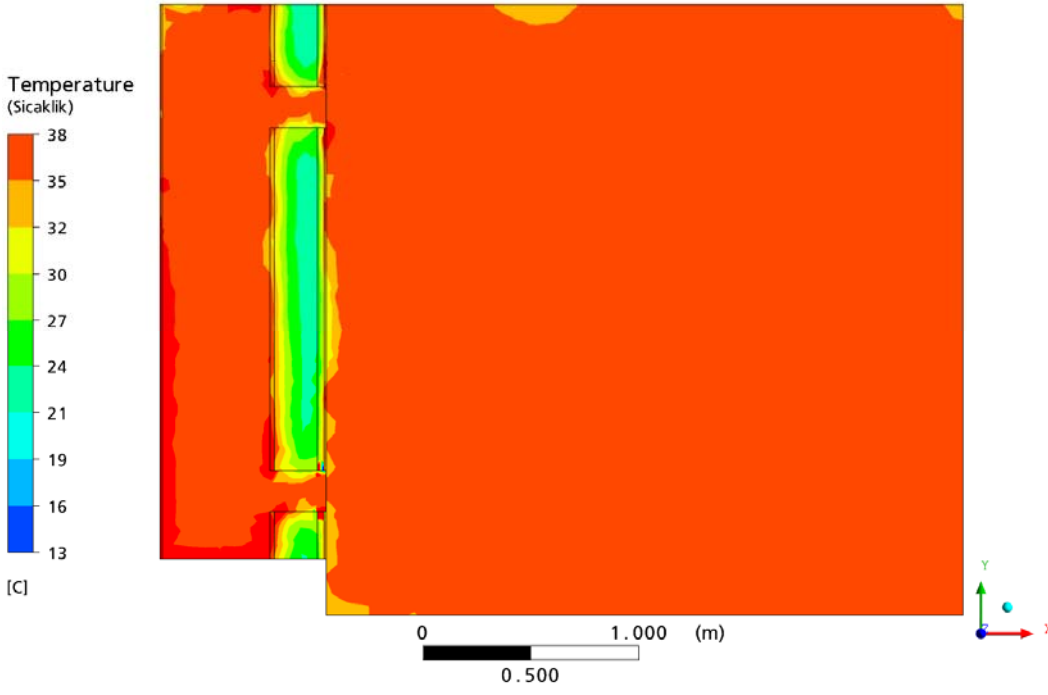
Şekil A.12 5 Şubat 2008, saat 12.00'deki, test odasındaki sıcaklık dağılımı.



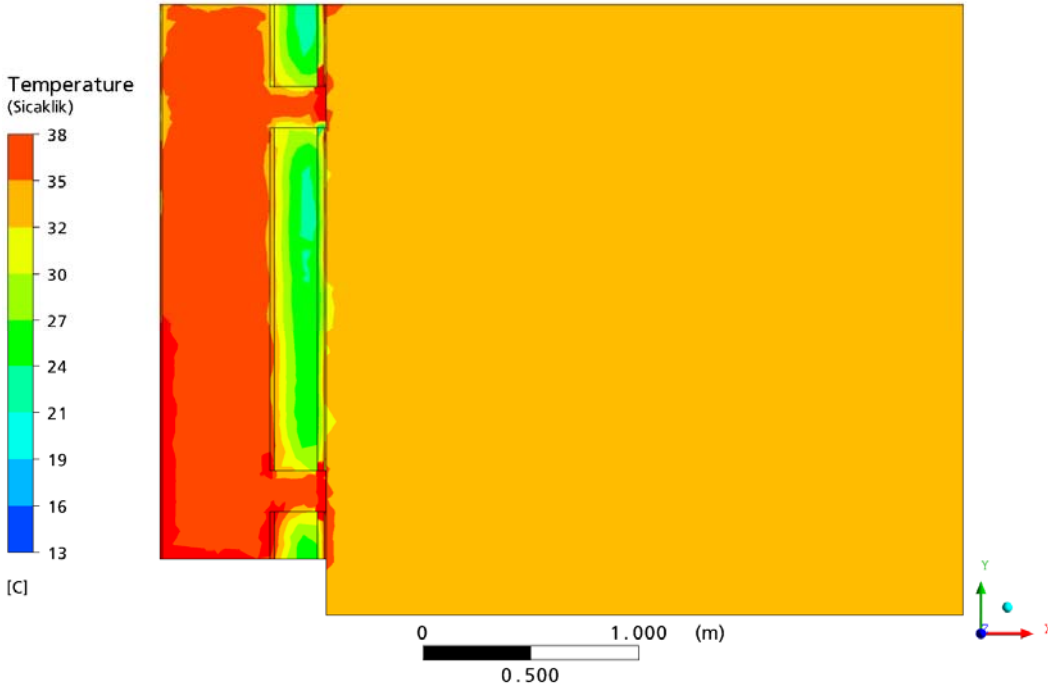
Şekil A.13 5 Şubat 2008, saat 13.00'teki, test odasındaki sıcaklık dağılımı.



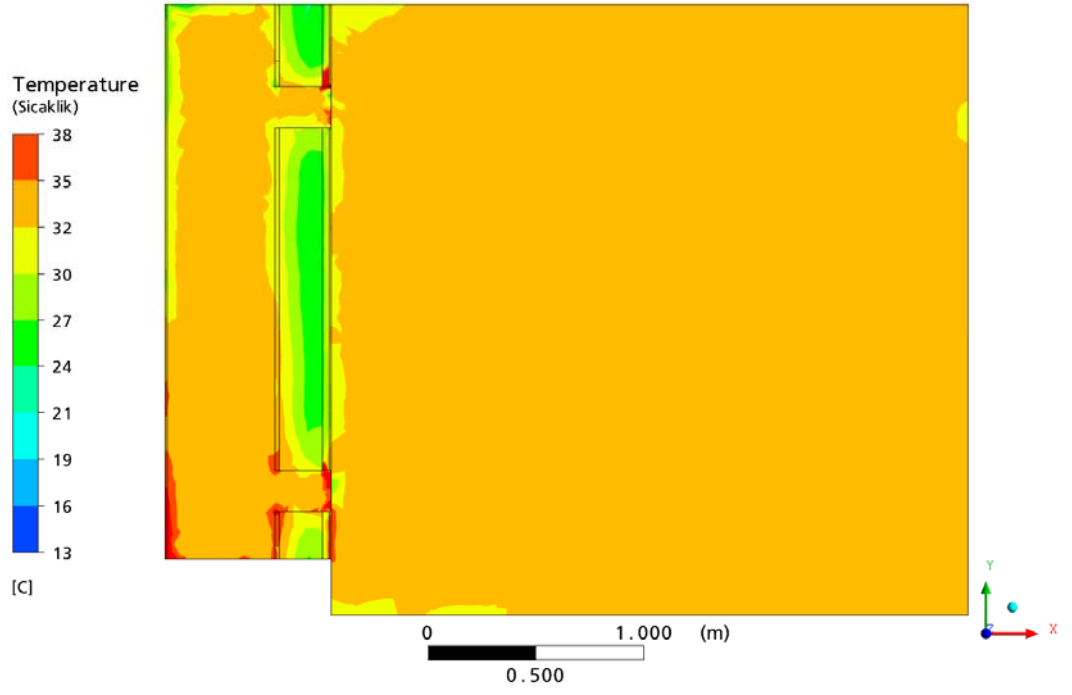
Şekil A.14 5 Şubat 2008, saat 14.00'teki, test odasındaki sıcaklık dağılımı.



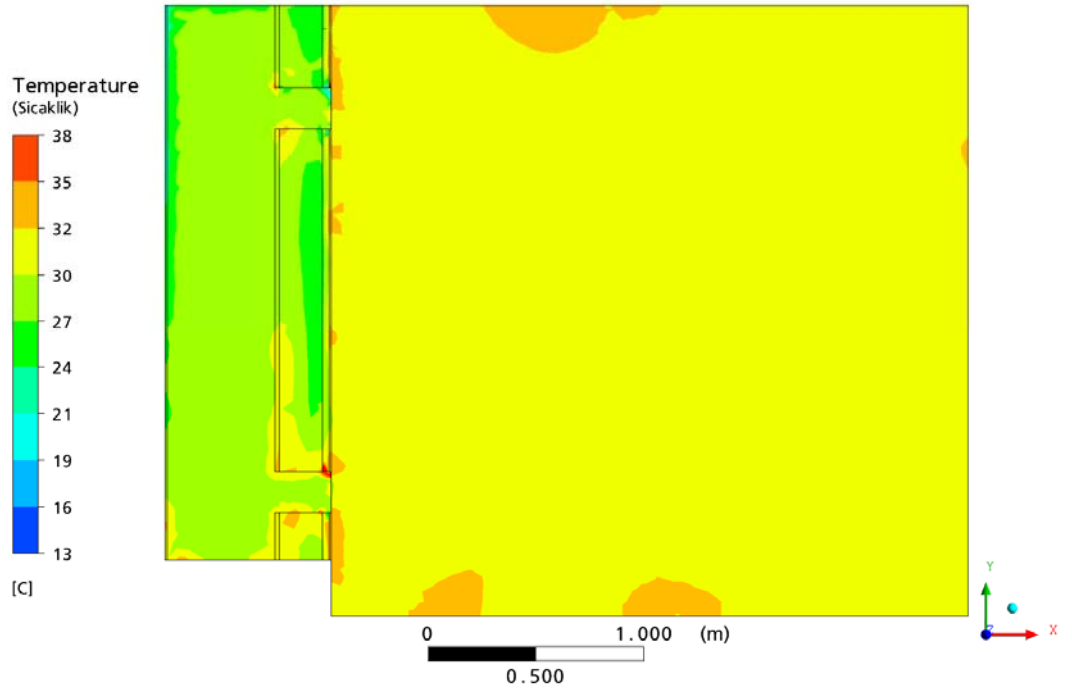
Şekil A.15 5 Şubat 2008, saat 15.00'teki, test odasındaki sıcaklık dağılımı.



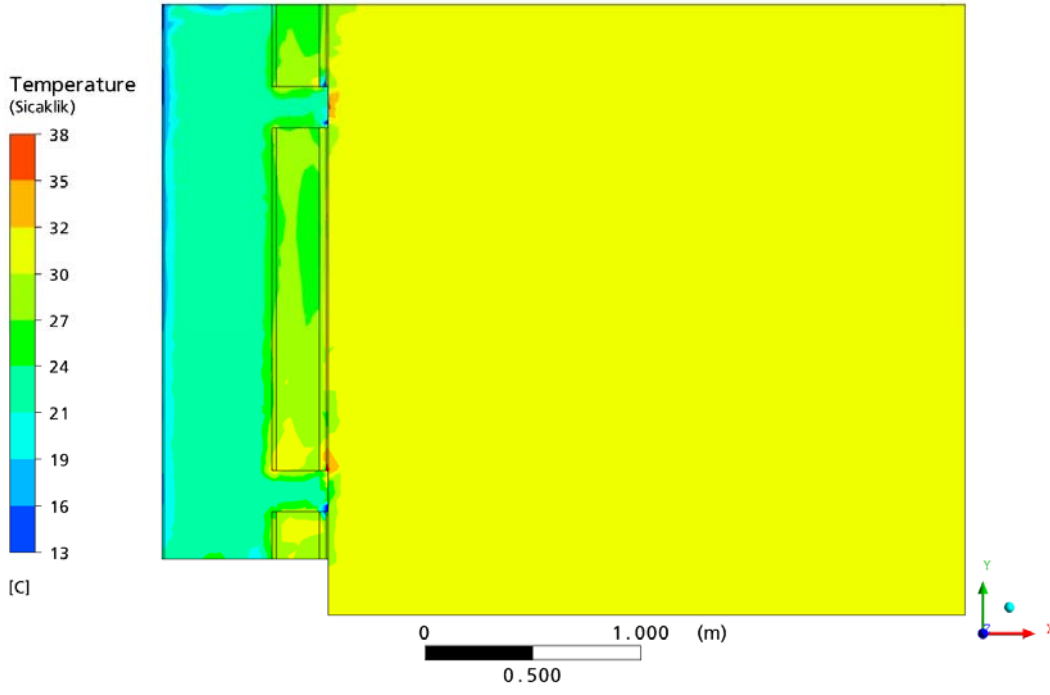
Şekil A.16 5 Şubat 2008, saat 16.00'daki, test odasındaki sıcaklık dağılımı.



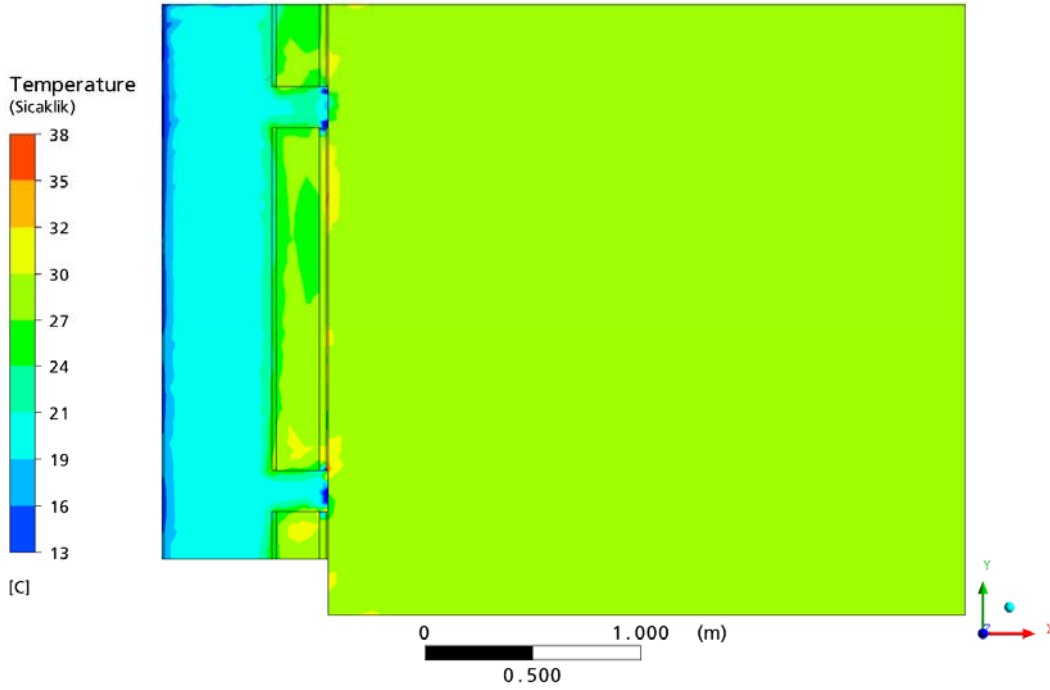
Şekil A.17 5 Şubat 2008, saat 17.00'deki, test odasındaki sıcaklık dağılımı.



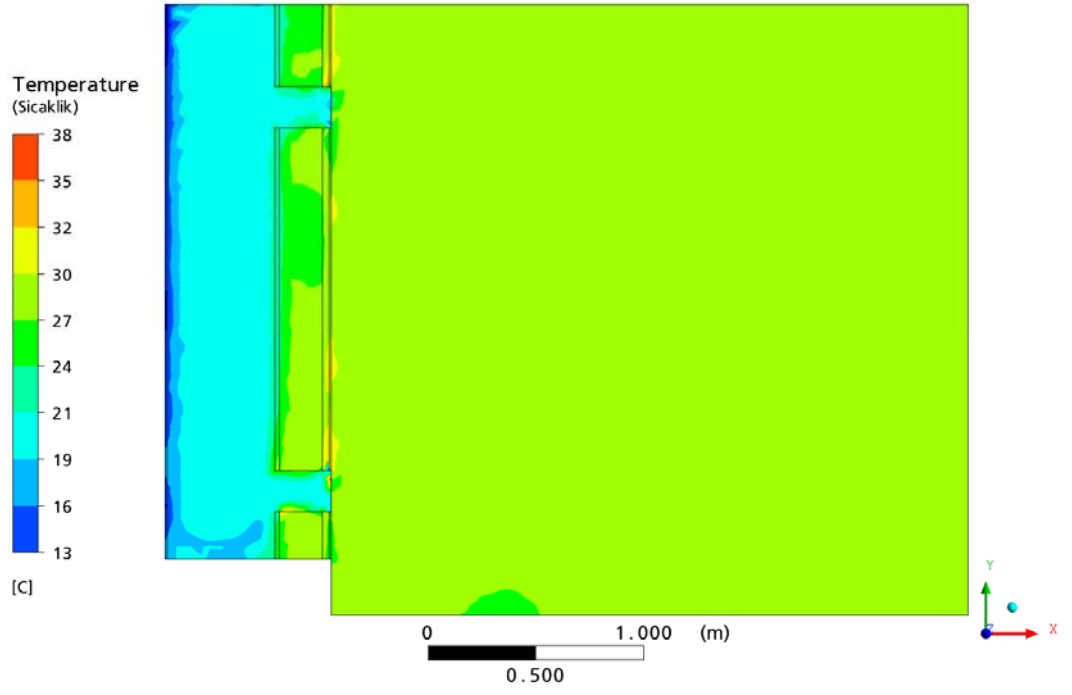
Şekil A.18 5 Şubat 2008, saat 18.00'deki, test odasındaki sıcaklık dağılımı.



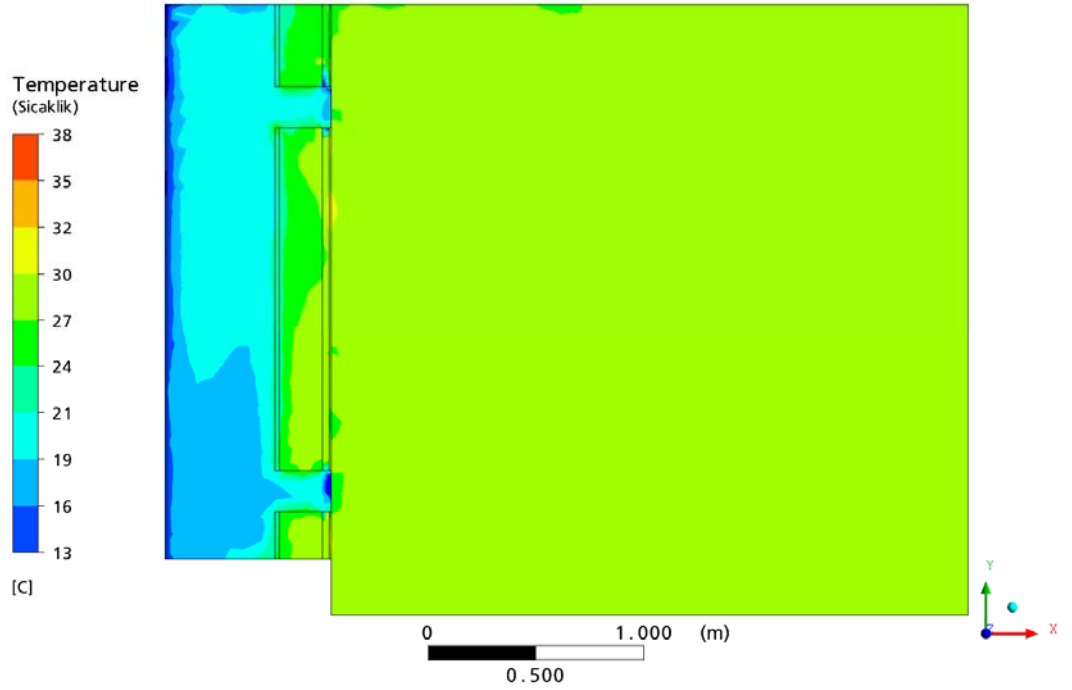
Şekil A.19 5 Şubat 2008, saat 19.00'daki, test odasındaki sıcaklık dağılımı.



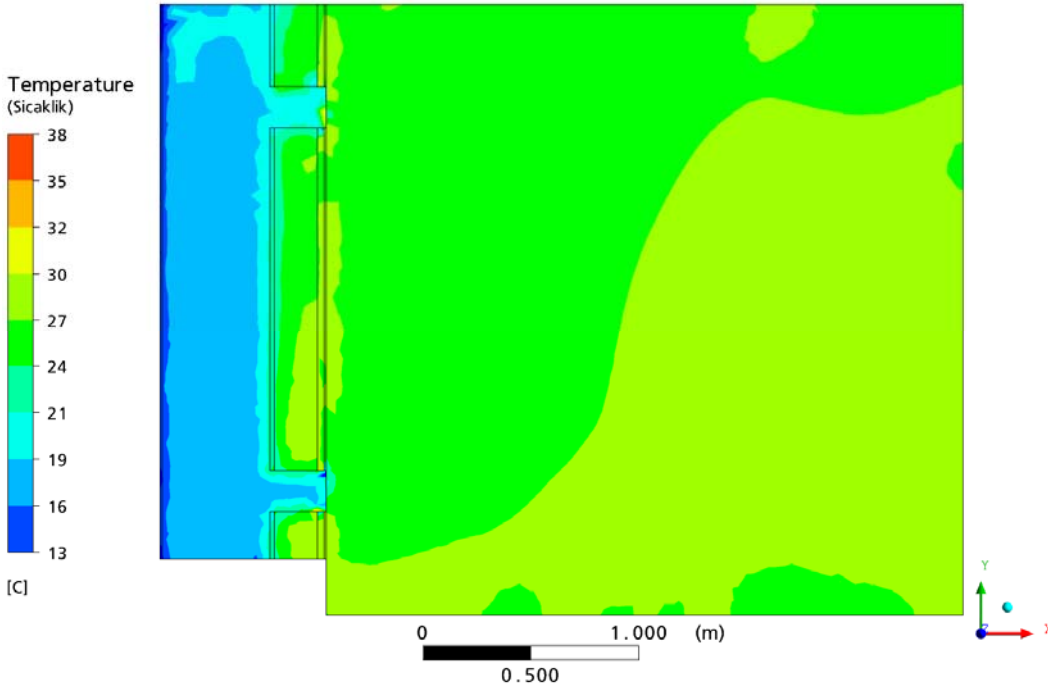
Şekil A.20 5 Şubat 2008, saat 20.00'deki, test odasındaki sıcaklık dağılımı.



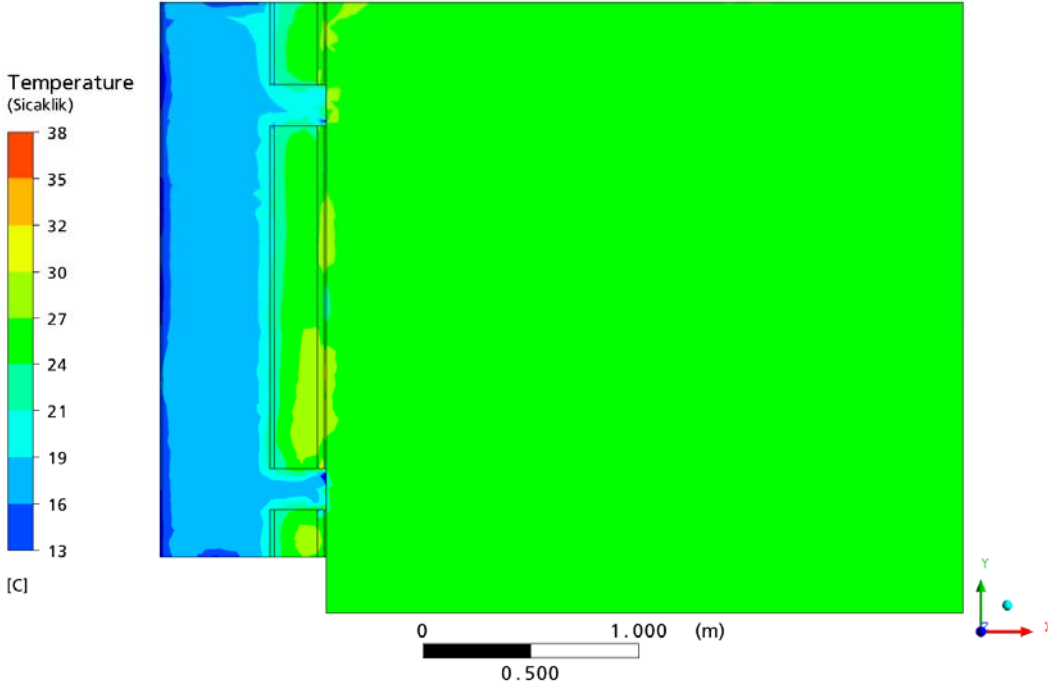
Şekil A.21 5 Şubat 2008, saat 21.00'deki, test odasındaki sıcaklık dağılımı.



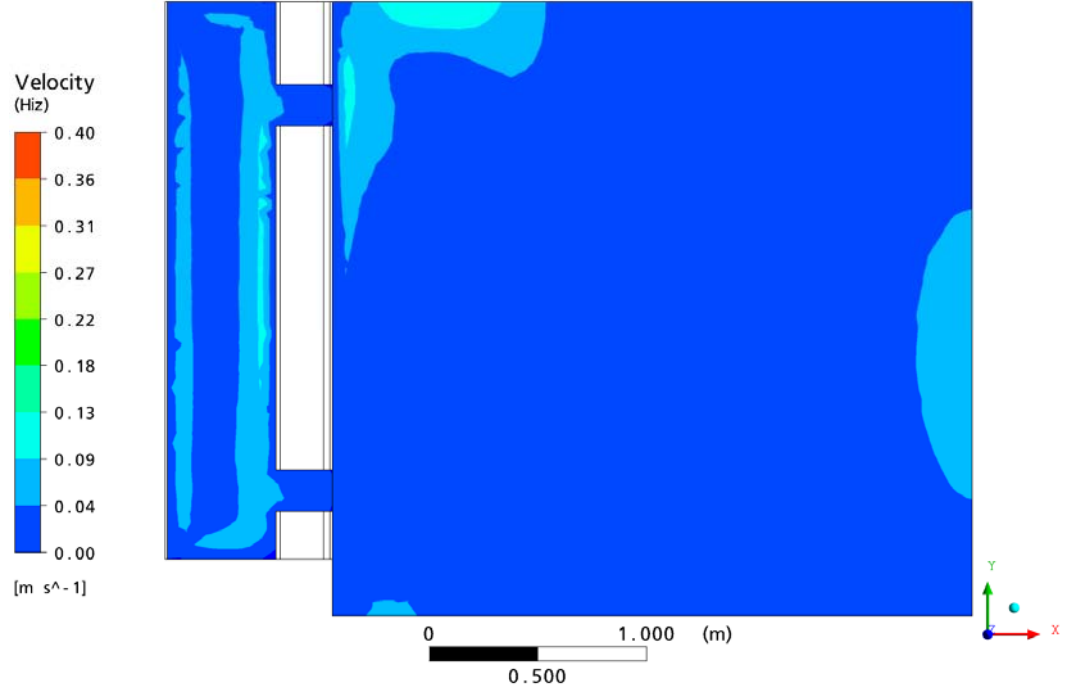
Şekil A.22 5 Şubat 2008, saat 22.00'deki, test odasındaki sıcaklık dağılımı.



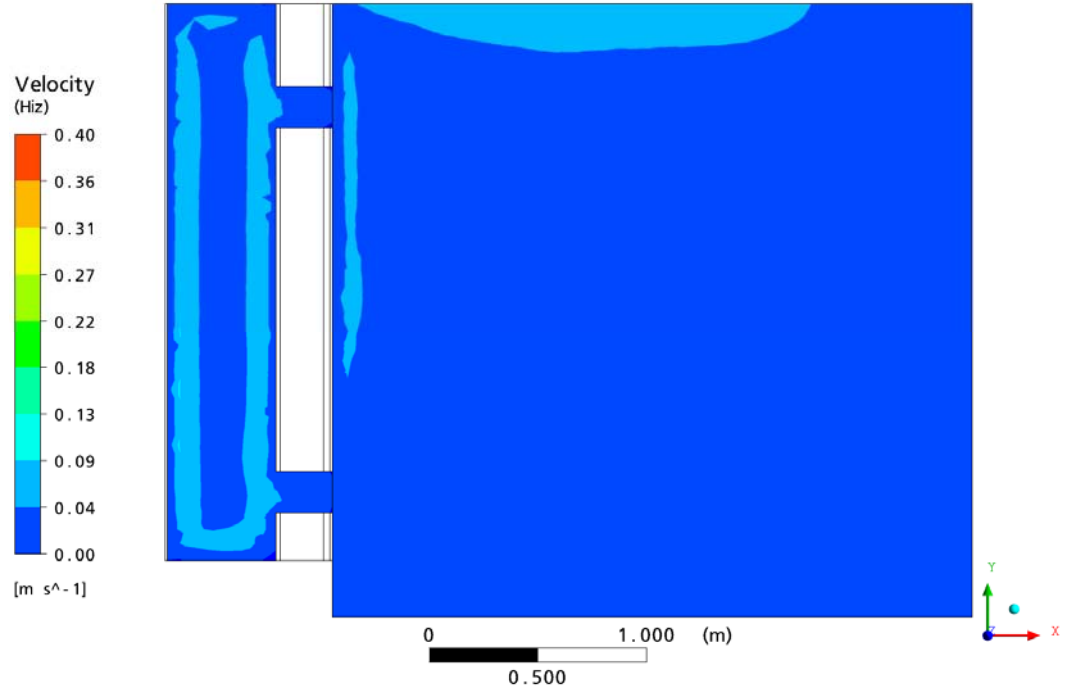
Şekil A.23 5 Şubat 2008, saat 23.00'teki, test odasındaki sıcaklık dağılımı.



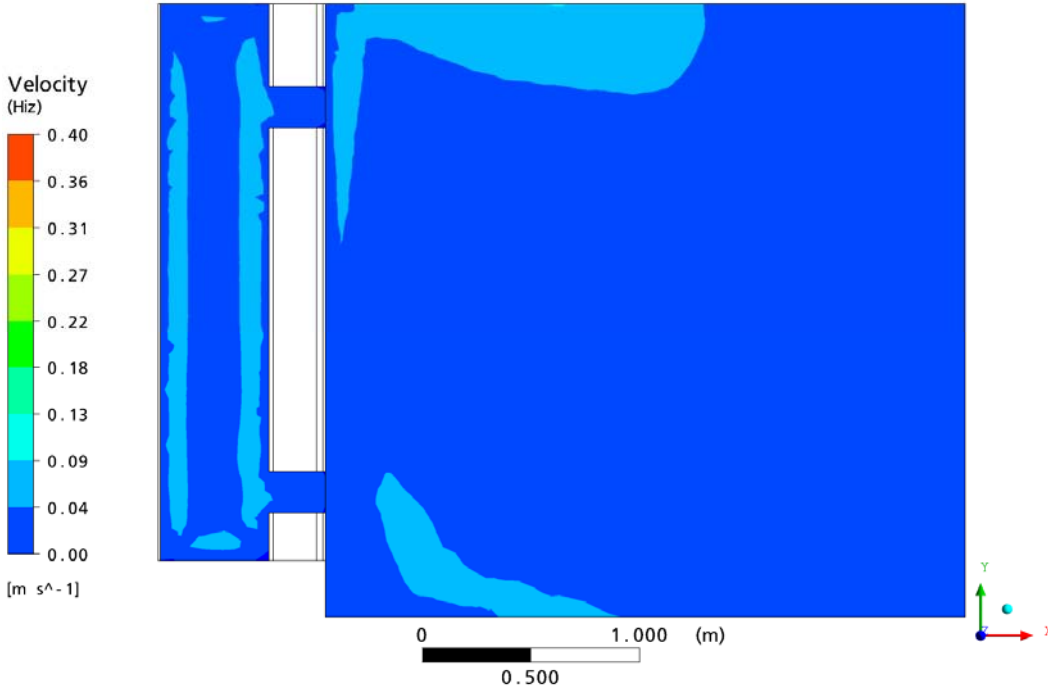
Şekil A.24 5 Şubat 2008, saat 24.00'teki, test odasındaki sıcaklık dağılımı.

**Ek 2 Test Odasındaki Hız Dağılımı**

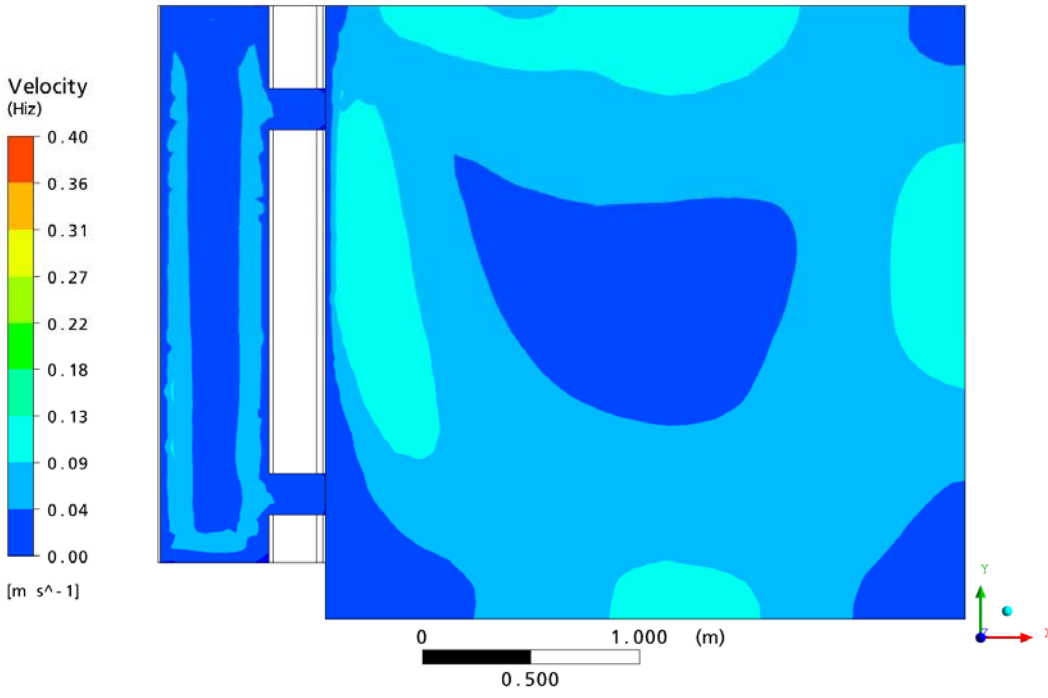
Şekil B.1 5 Şubat 2008, saat 01.00'deki, test odasındaki hız dağılımı.



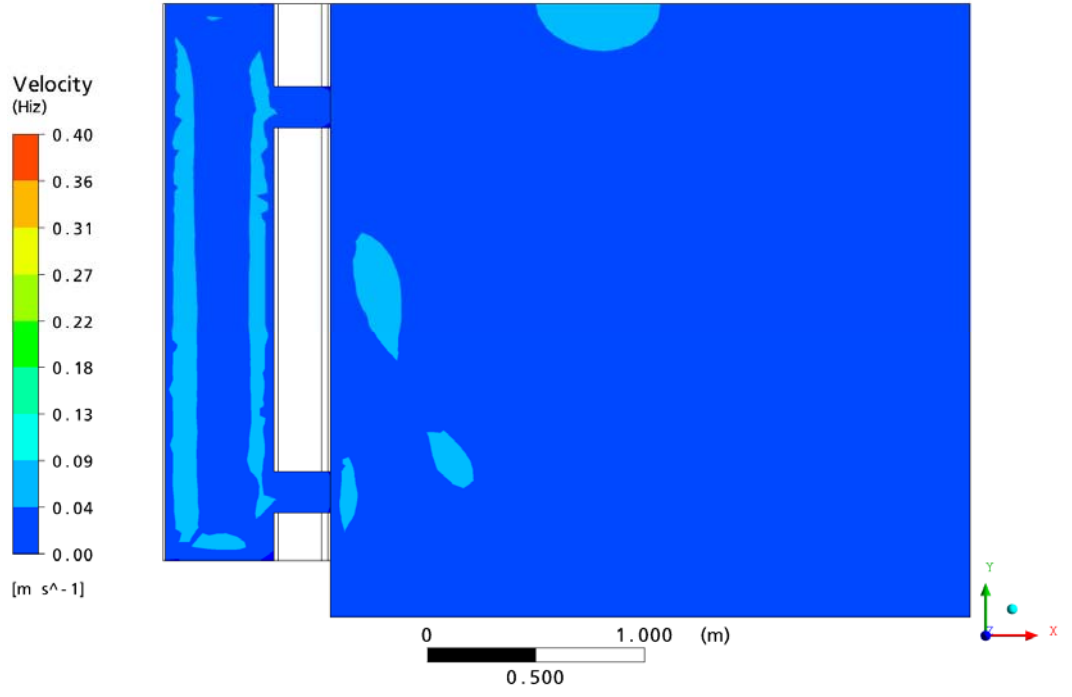
Şekil B.2 5 Şubat 2008, saat 02.00'deki, test odasındaki hız dağılımı.



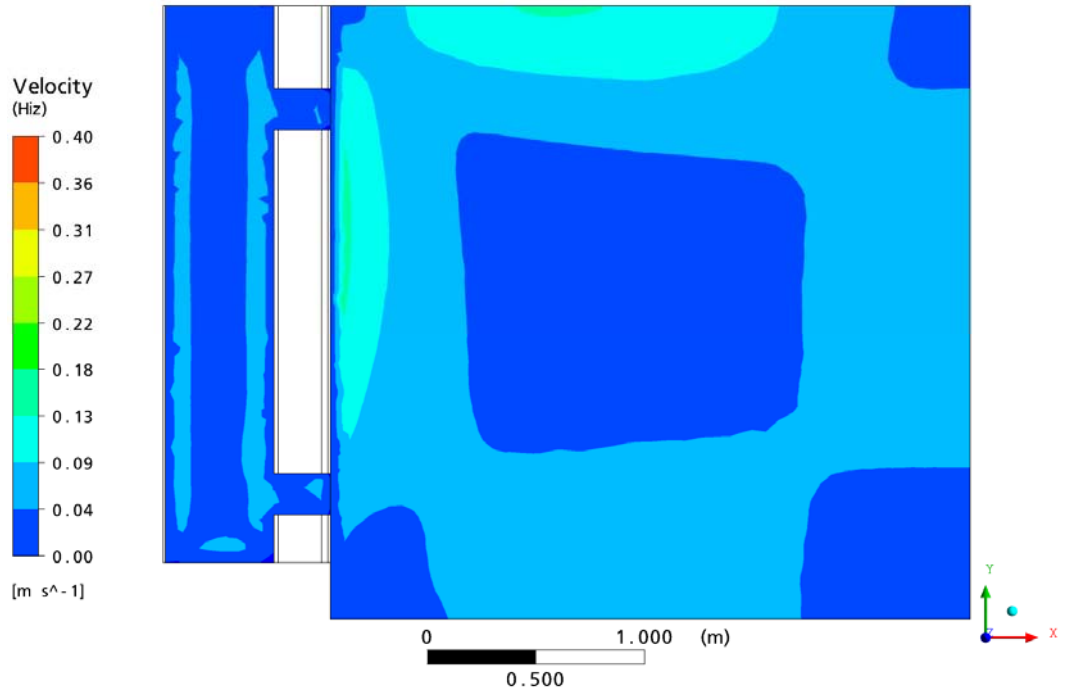
Şekil B.3 5 Şubat 2008, saat 03.00'teki, test odasındaki hız dağılımı.



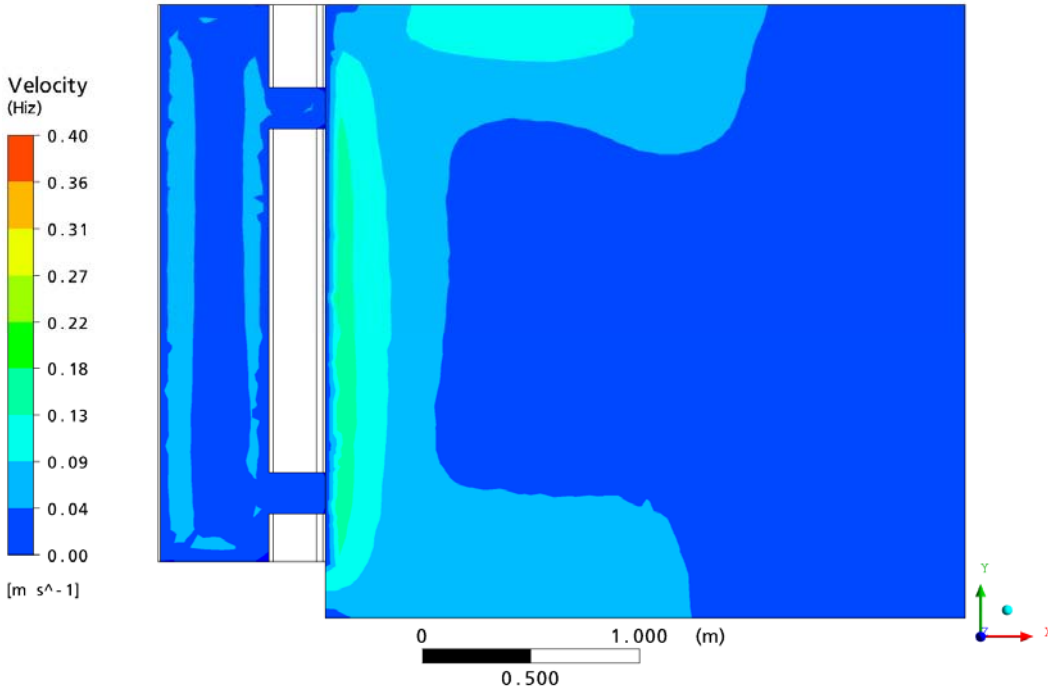
Şekil B.4 5 Şubat 2008, saat 04.00'teki, test odasındaki hız dağılımı.



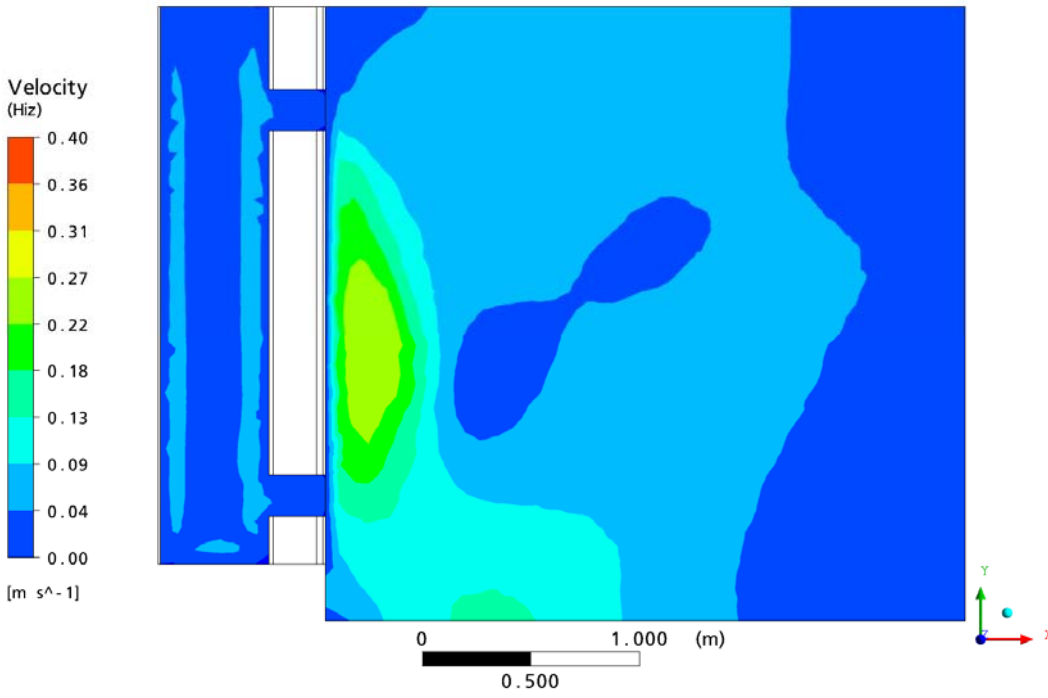
Şekil B.5 5 Şubat 2008, saat 05.00'teki, test odasındaki hız dağılımı.



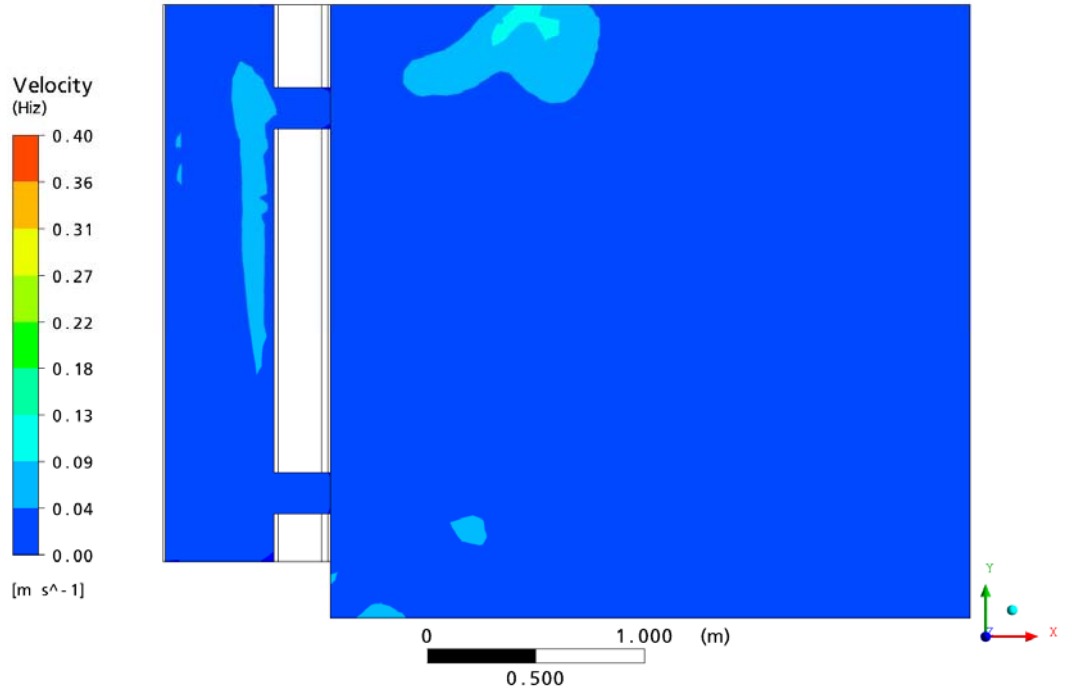
Şekil B.6 5 Şubat 2008, saat 06.00'daki, test odasındaki hız dağılımı.



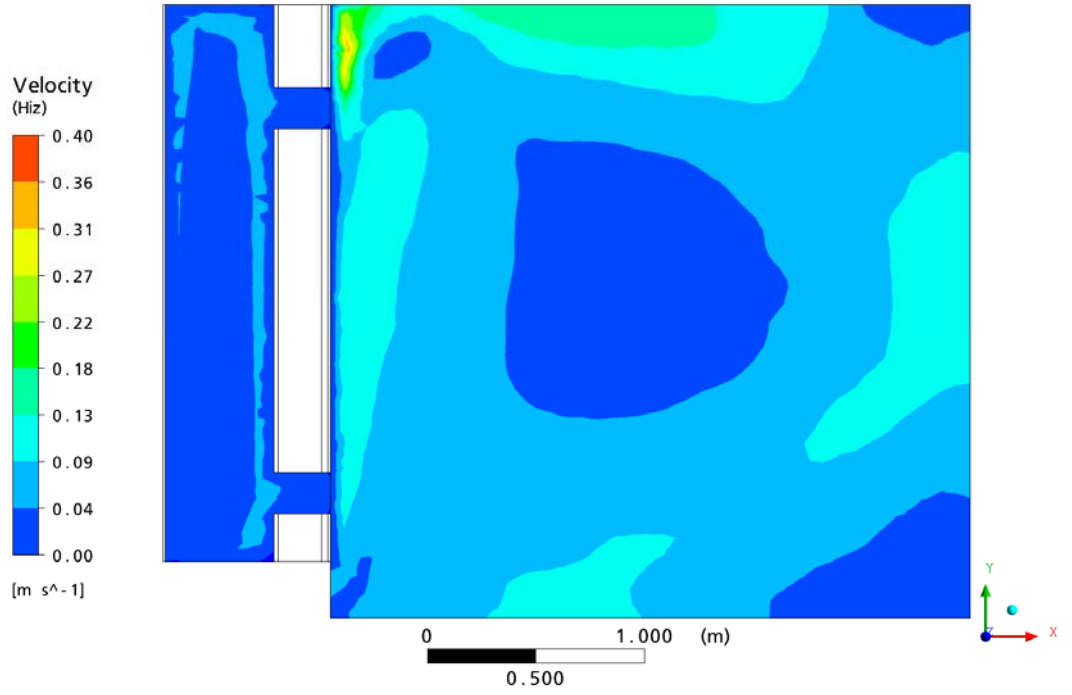
Şekil B.7 5 Şubat 2008, saat 07.00'deki, test odasındaki hız dağılımı.



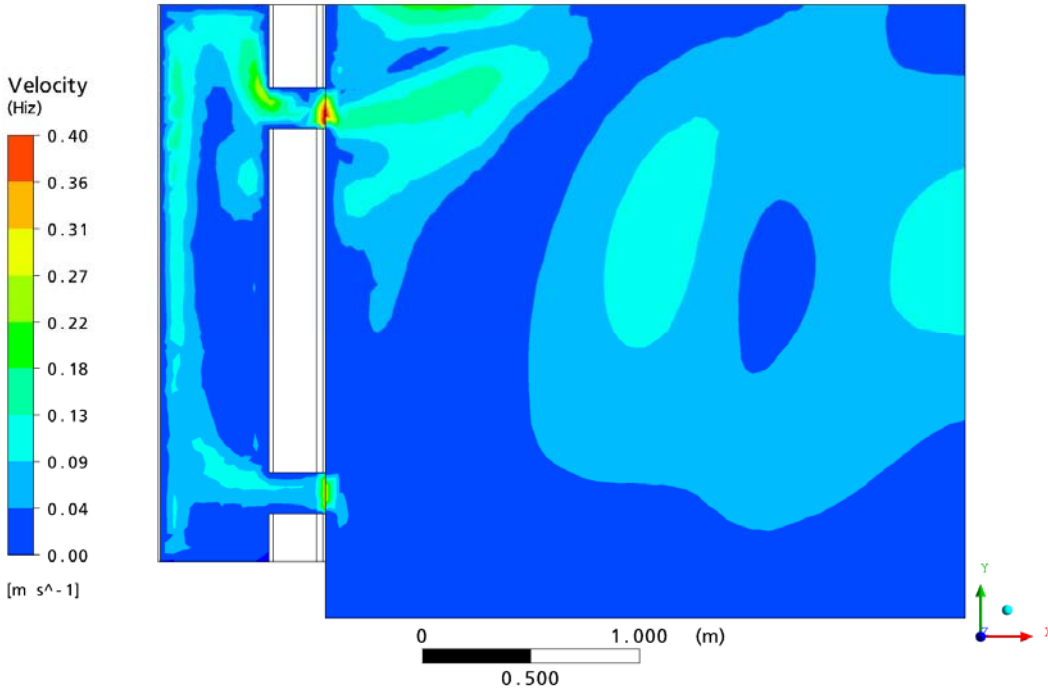
Şekil B.8 5 Şubat 2008, saat 08.00'deki, test odasındaki hız dağılımı.



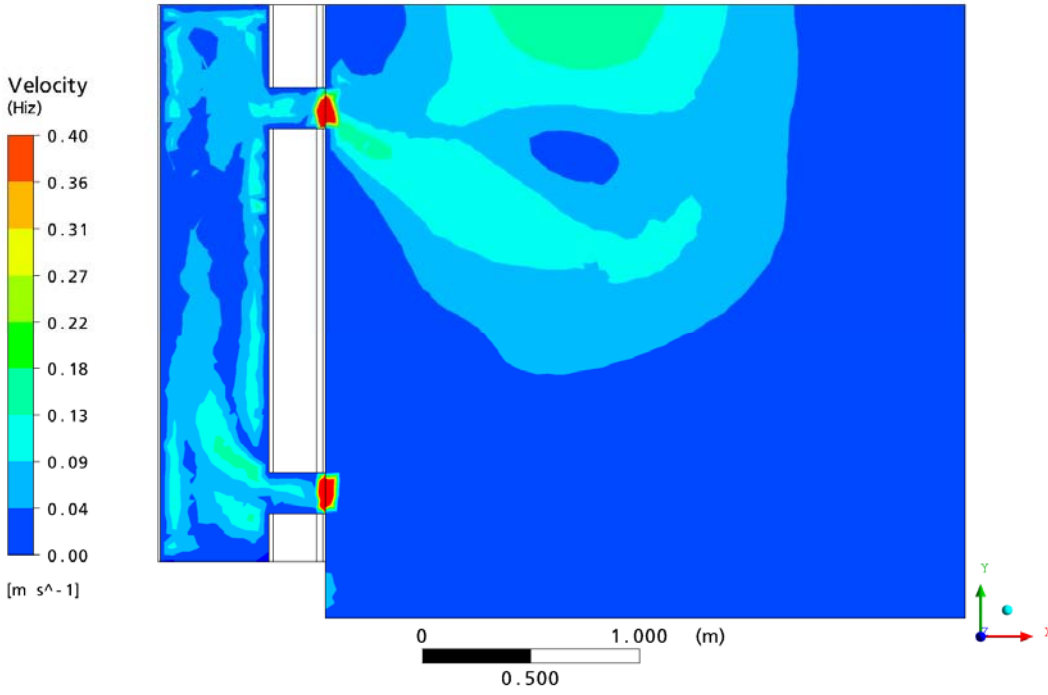
Şekil B.9 5 Şubat 2008, saat 09.00'daki, test odasındaki hız dağılımı.



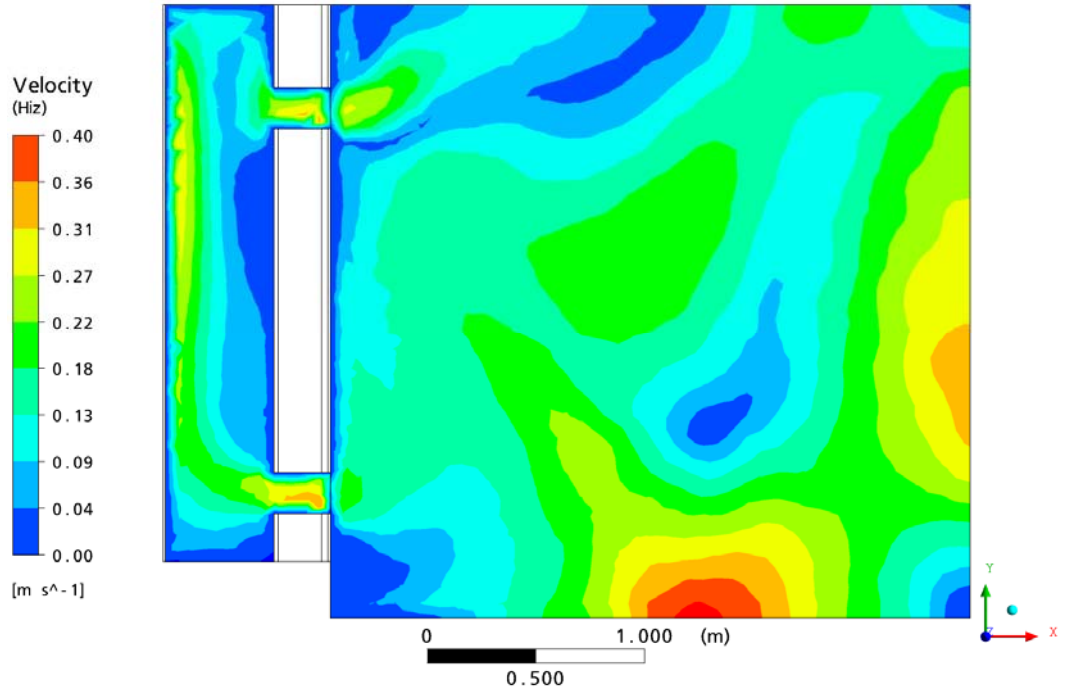
Şekil B.10 5 Şubat 2008, saat 10.00'daki, test odasındaki hız dağılımı.



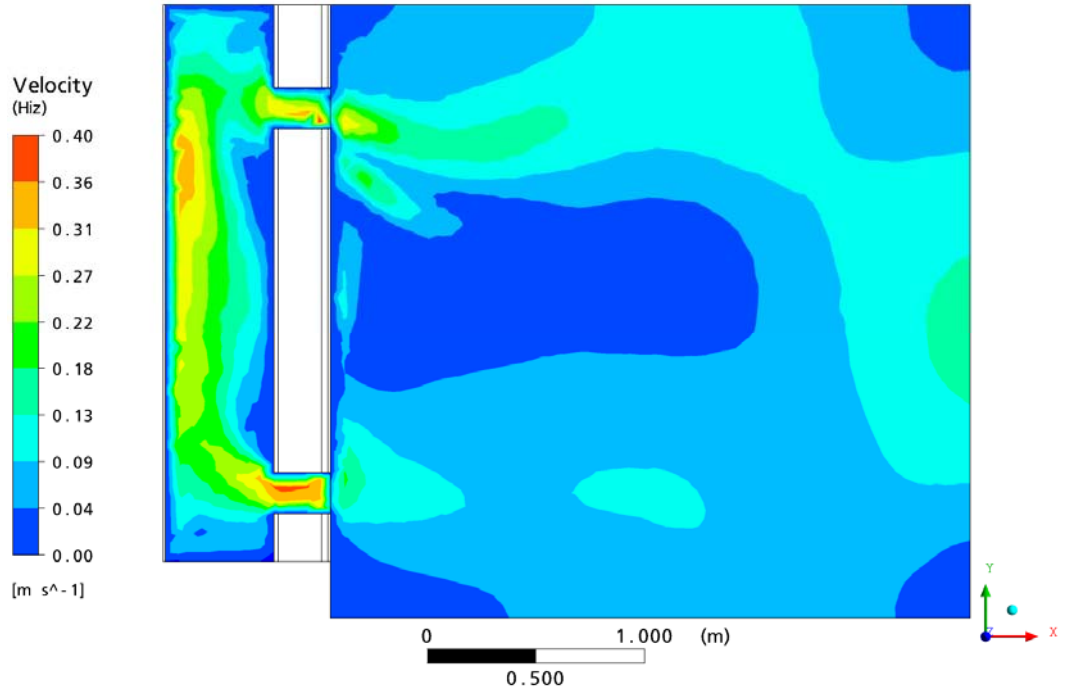
Şekil B.11 5 Şubat 2008, saat 11.00'deki, test odasındaki hız dağılımı.



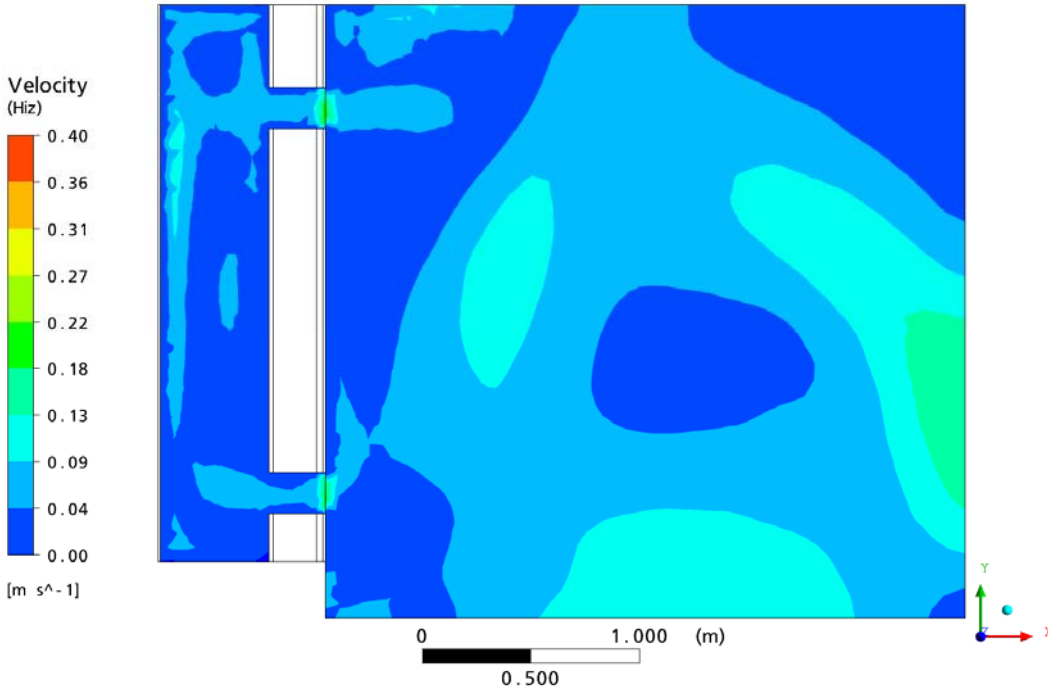
Şekil B.12 5 Şubat 2008, saat 12.00'deki, test odasındaki hız dağılımı.



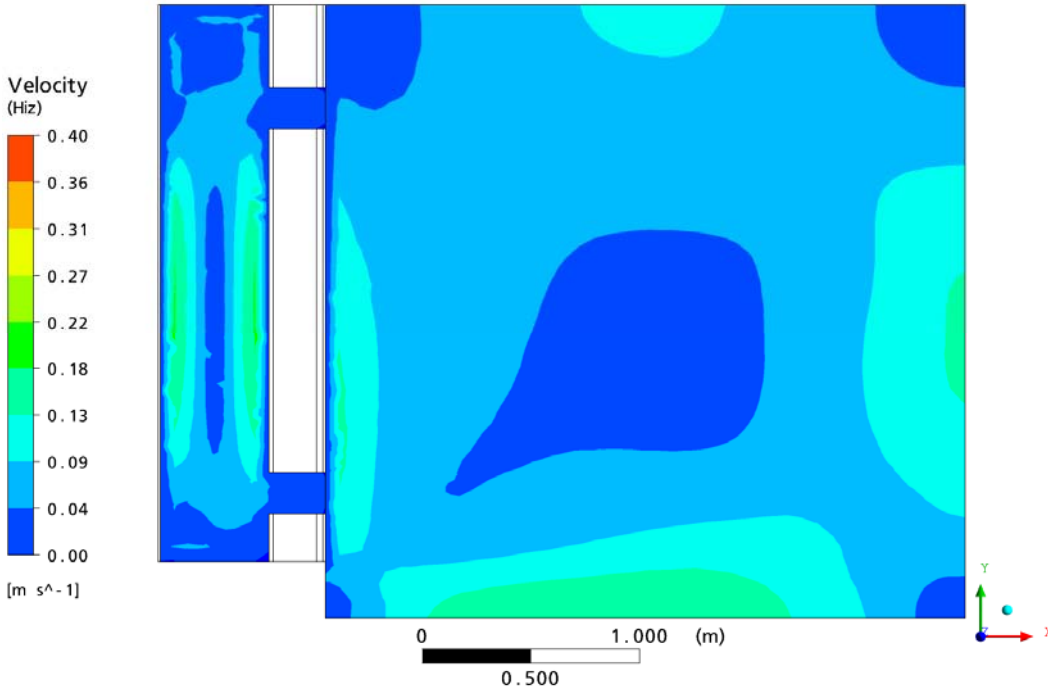
Şekil B.13 5 Şubat 2008, saat 13.00'teki, test odasındaki hız dağılımı.



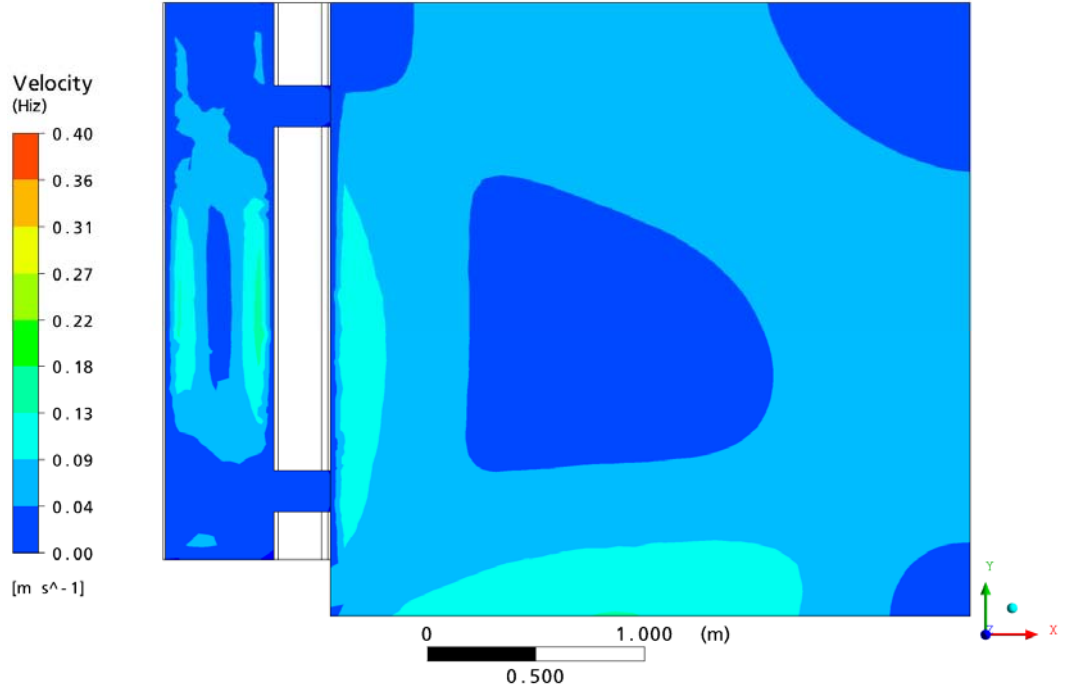
Şekil B.14 5 Şubat 2008, saat 14.00'teki, test odasındaki hız dağılımı.



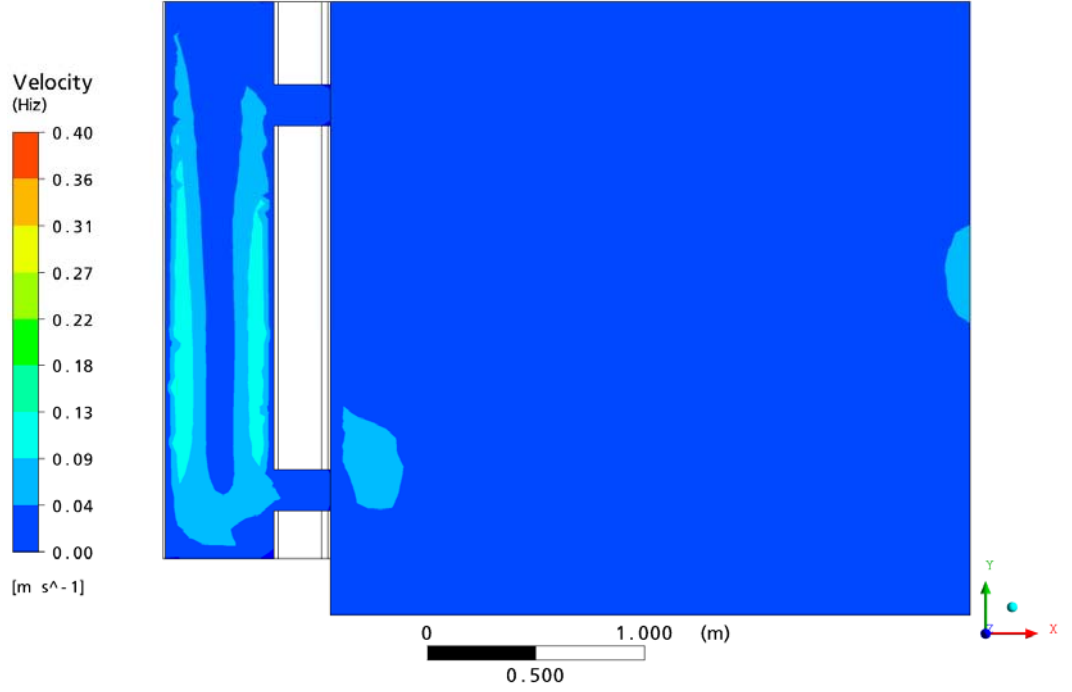
Şekil B.15 5 Şubat 2008, saat 15.00'teki, test odasındaki hız dağılımı.



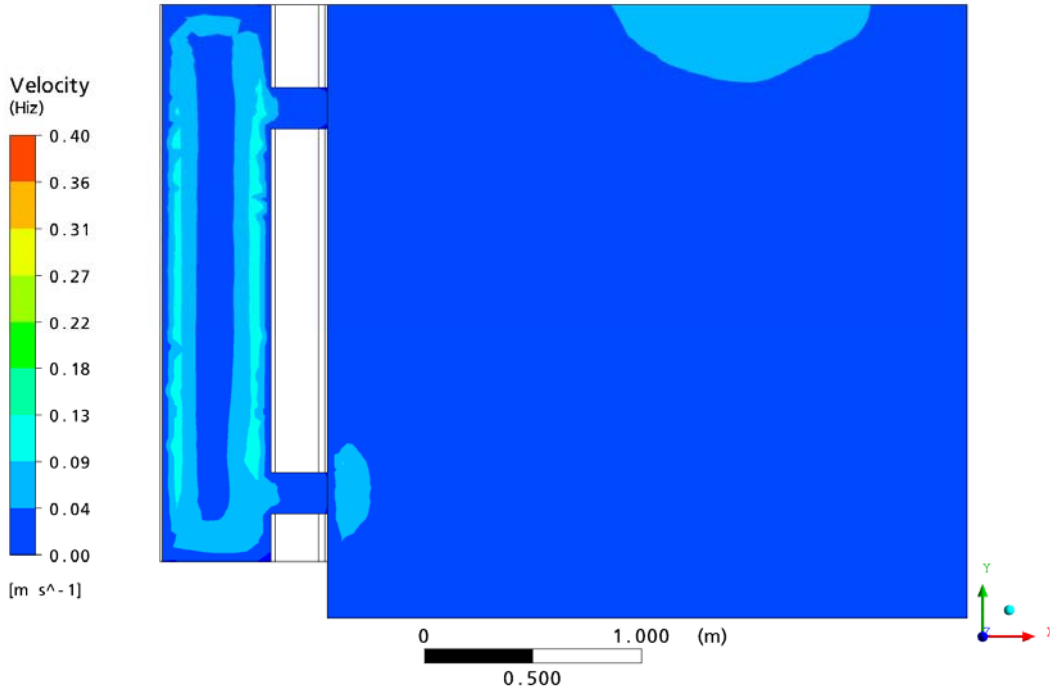
Şekil B.16 5 Şubat 2008, saat 16.00'daki, test odasındaki hız dağılımı.



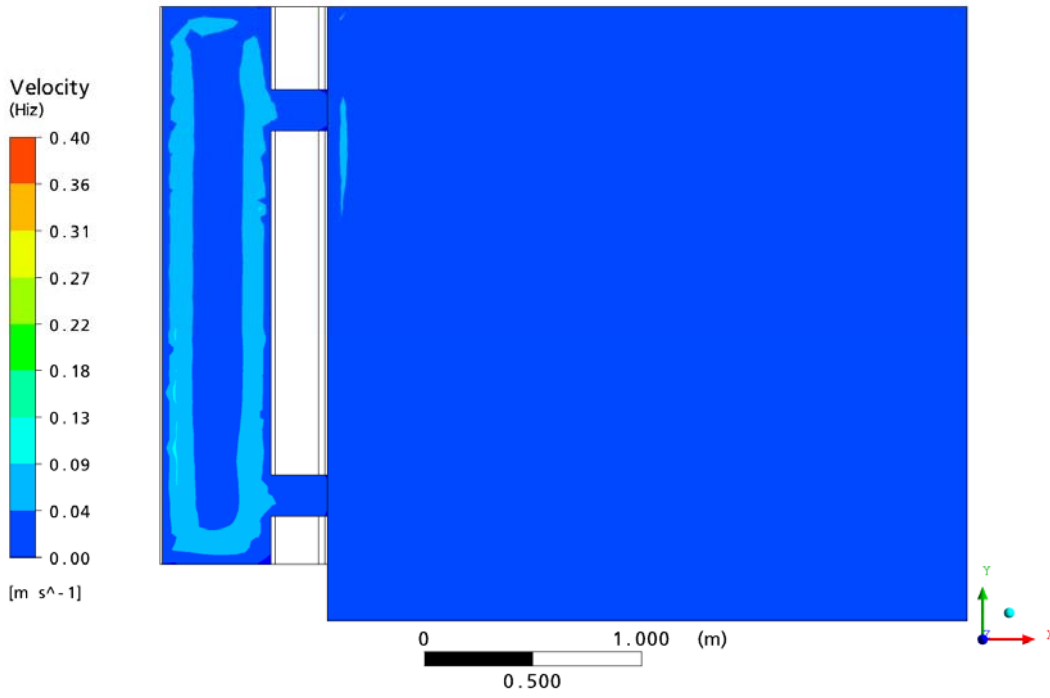
Şekil B.17 5 Şubat 2008, saat 17.00'deki, test odasındaki hız dağılımı.



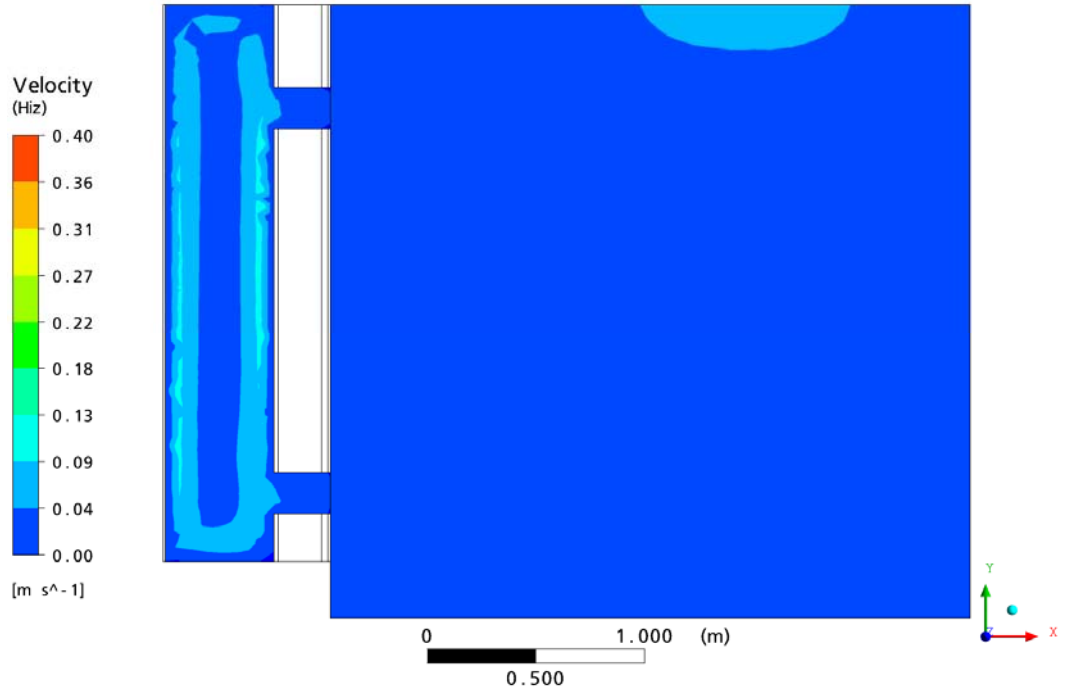
Şekil B.18 5 Şubat 2008, saat 18.00'deki, test odasındaki hız dağılımı.



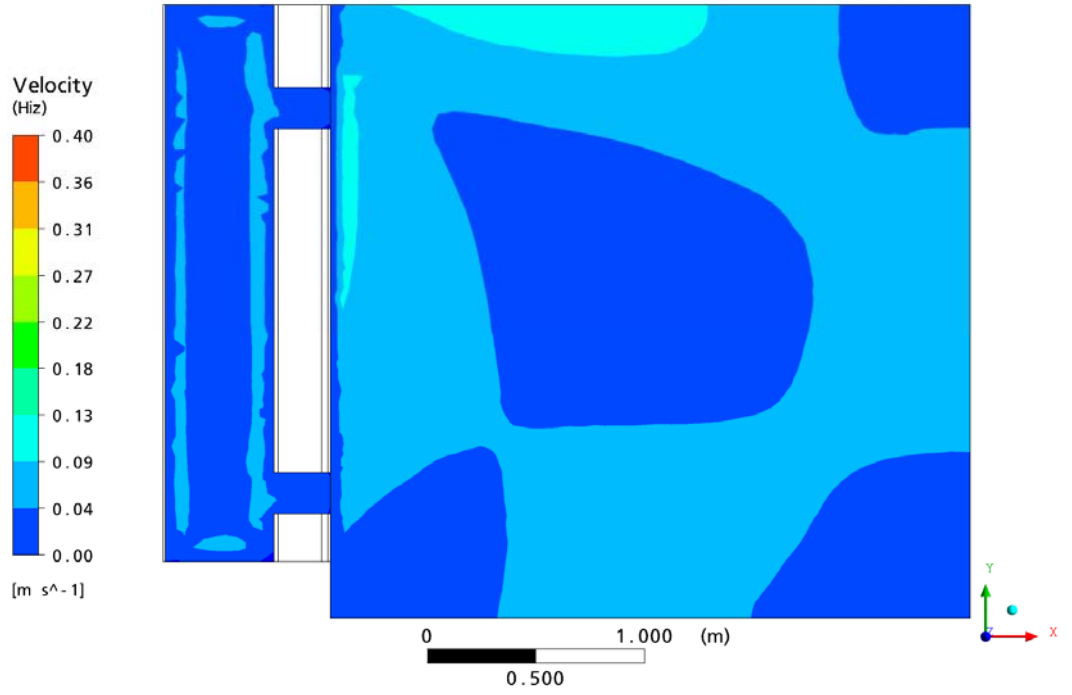
Şekil B.19 5 Şubat 2008, saat 19.00'daki, test odasındaki hız dağılımı.



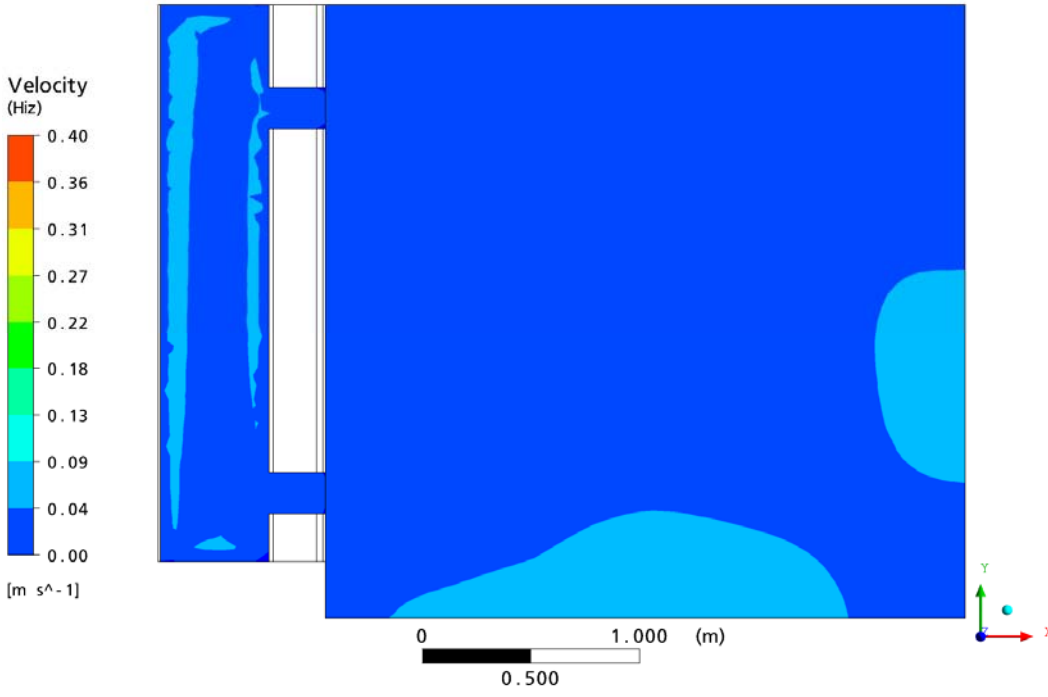
Şekil B.20 5 Şubat 2008, saat 20.00'deki, test odasındaki hız dağılımı.



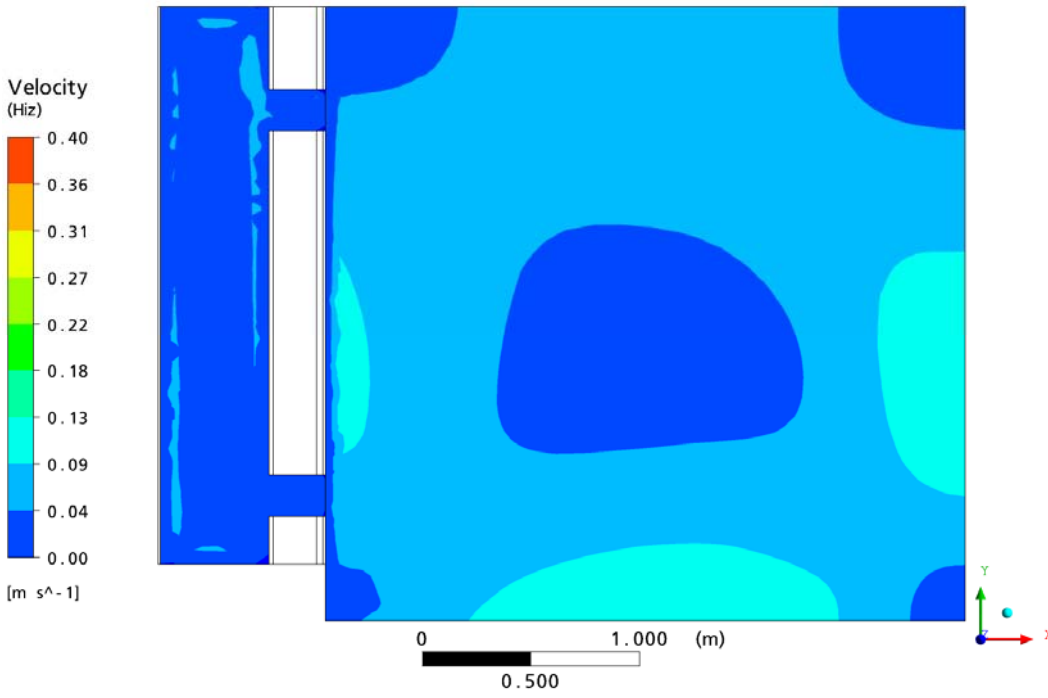
Şekil B.21 5 Şubat 2008, saat 21.00'deki, test odasındaki hız dağılımı.



Şekil B.22 5 Şubat 2008, saat 22.00'deki, test odasındaki hız dağılımı.



Şekil B.23 5 Şubat 2008, saat 23.00'teki, test odasındaki hız dağılımı.



Şekil B.24 5 Şubat 2008, saat 24.00'teki, test odasındaki hız dağılımı.

## **ÖZGEÇMİŞ**

24.03.1978 yılında İzmir’de doğdu. Orta öğrenimini 1993 yılında Bornova Anadolu Lisesi’nde, lise öğrenimini ise 1996 yılında İzmir Fen Lisesi’nde tamamladı. Lisans eğitimini 2000 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi’nde tamamladı. Yüksek Lisansı’nı 2004 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Ana Bilim Dalı Çevre Kontrolü ve Yapı Teknolojisi’nde tamamladı. 2004 yılında Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Güneş Enerjisi Ana Bilim Dalı’nda doktora programına başladı. 2005 yılından bu yana Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü’nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.

Başak KUNDAKCI KOYUNBABA