

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(DOKTORA TEZİ)

**YAPI İLE BÜTÜNLEŞTİRİLEBİLİR GÜNEŞ PİLİ/
TERMAL TOPLAYICI (PV/T) HİBRİD SİSTEMİN
PERFORMANS ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU**

Dilşad ENGİN

Güneş Enerjisi Anabilim Dalı

Bilim dalı Kodu: 625.05.04

Sunuş Tarihi: 1.8.2006

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Metin ÇOLAK

Bornova-İZMİR

Sayın **Dilşad Engin** tarafından DOKTORA TEZİ olarak sunulan “**Yapı ile Bütünleştirilebilir Güneş Pili/Termal Toplayıcı (PV/T) Hibrid Sistemin Performans Analizi ve Optimizasyonu**” başlıklı bu çalışma, E.Ü. “Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği” ve E.Ü. Fen Bilimleri Enstitü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:**İmza**Jüri Başkanı: **Prof. Dr. Metin Çolak**

.....

Raportör üye: **Prof. Dr. Ali Güngör**

.....

Üye: **Prof. Dr. Erol Uyar**

.....

Üye: **Prof. Dr. Sıddık İçli**

.....

Üye: **Doç. Dr. Haldun Karaca**

.....

ÖZET**YAPI İLE BÜTÜNLEŞTİRİLEBİLİR GÜNEŞ PİLİ/TERMAL
TOPLAYICI (PV/T) HİBRİD SİSTEMİN PERFORMANS ANALİZİ
VE OPTİMİZASYONU****ENGİN, DİLŞAD****Doktora Tezi, Güneş Enerjisi Enstitüsü****Tez Yöneticisi: Prof. Dr. Metin Çolak****Ağustos 2006, 151 sayfa**

Bu tezde güneş pili/termal toplayıcı (PV/T) hibrid sisteminin elektriksel ve ısıl verimi incelenerek binaların elektrik, sıcak su ve ısıtma gibi gereksinimlerinin karşılanmasında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla bir yarı saydam PV modül ve Titanium Dioksit kaplamalı düzlemsel toplayıcı beraber kullanılmıştır. Kurulan hibrid sistemden maksimum verimin elde edilebilmesi için optimizasyon yapılmıştır.

Sistem doğal dolaşimli ve zorlanmış dolaşimli olarak çalıştırılarak verim incelenmiştir. PV/T panelin verimi termal toplayıcı ve güneş modülü verimleriyle karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Güneş pili, termal toplayıcı, hibrid sistem.

ABSTRACT

**BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAIC AND THERMAL
COLLECTOR (PV/T) HYBRID SYSTEM'S PERFORMANCE
ANALYSIS AND OPTIMIZATION**

ENGİN, DİLŞAD

PHD in, Solar Energy Institute

Supervisor: Prof. Dr. Metin Çolak

August 2006, 151 pages

In this thesis, photovoltaic/thermal collector (PV/T) hybrid system's electrical and thermal efficiencies are observed and it is investigated whether the system can compensate buildings' electrical, hot water and heating needs. For this reason, a semi-transparent PV module is combined with a Titanium Dioxide coated thermal collector, in order to optimise the hybrid sytem's efficiency.

PV/T hybrid system's collector is operated in the natural and forced flow modes in order to examine the efficiencies at different flow rates. The system's efficiency is compared with the thermal collector and PV module's efficiencies.

Keywords: Solar cell, solar collector, hybrid system.

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam sırasında yardımlarından dolayı eőim Mustafa ve bana gösterdiği sabırdan dolayı kızım Didem'e, deneylerim sırasında yardımlarını esirgemeyen Güneş Enerėisi Enstitüsü, Makine Mühendisliği ile Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü ve Ege Meslek Yüksekokulu çalıőanlarına ve tüm eğitimim süresince yardımlarını esirgemeyen annem ve babama teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	V
ABSTRACT	VII
TEŞEKKÜR	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	XV
ÇİZELGELER DİZİNİ	XXI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XXIII
1 GİRİŞ	1
2 ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	5
3 MATERYAL VE METOT	25
3.1 Giriş.....	25
3.2 PV/T Hibrid Sistem Elemanları	25
3.2.1 Güneş Modülleri	25
3.2.2 Termal Kollektörler	30
3.3 Güneş Pili Modeli	42
3.4 Hibrid Sistem Modeli.....	49
3.4.1 Enerji Dengesi Eşitlikleri	56
3.5 Kullanılan Yöntem	68
3.6 Kollektör Sıcaklıklarının Ölçülmesi	75
3.6.1 RTD – Dirençsel Sıcaklık Algılayıcı.....	77
3.6.2 Kollektör Sıcaklıklarının Ölçülmesinde Kullanılan Devreler	84

İÇİNDEKİLER (Devam)

	<u>Sayfa</u>
3.7 Pompa Özellikleri	90
3.8 Güneş Modülü ve Camın Geçirgenliklerinin Ölçümünde Kullanılan Düzenek	91
4 BULGULAR	93
4.1 Verimin Hesaplanması.....	110
4.2 Sıcaklığın Verime Etkisi.....	115
5 SONUÇLAR, TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	121
5.1 Sonuç ve Tartışma	121
5.2 Öneriler	124
KAYNAKLAR DİZİNİ	126
EKLER.....	131
EK 1 MATLAB ORTAMINDA YAZILAN GÜNEŞ PİLİ MATEMATİK MODELİ.....	131
EK 2 MATLAB ORTAMINDA YAZILAN TERMAL TOPLAYICI MATEMATİK MODELİ.....	135
EK 3 DENEY DÜZENİNDE KULLANILAN CİHAZLARA AİT TEKNOLOJİK VERİLER	140
ÖZGEÇMİŞ.....	149

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>		<u>Sayfa</u>
Şekil 2-1	PV/T sistemin kesiti. PV/T sistemdeki malzeme katmanları ile sıcaklıklar ve çeşitli ısı akıları gösterilmektedir. Kesikli çizgi panelin yüzeyindeki sıcaklık dağılımını göstermektedir.	18
Şekil 2-2	Termal toplayıcının (□PV/T sistemin elektrik üretimi olmadan ve elektrik üretirkenki ölçülen ısıl verimi (x). Ölçümlerdeki belirsizlikler çubuk uzunluklarıyla gösterilmiştir.	19
Şekil 2-3	1D, 2D ve 3D termal modellerinin elektrik üretimi olmadığı durum için karşılaştırılması.	21
Şekil 3-1	Çeşitli yarı saydam güneş pilleri (Sunways Powercell)	27
Şekil 3-2	Yarı saydam güneş pillerinin çatı malzemesi olarak kullanımı	27
Şekil 3-3	RWE Schott Solar firmasının yarı saydam ince-film a-Si tandem güneş modülünün görünüşü.....	28
Şekil 3-4	Aktif, dolaylı ve antifrizli sistem (Solar Water Heating.htm, NREL EL-May 1996).....	32
Şekil 3-5	Aktif, dolaylı, iki tanklı Drain-Back Sistemleri (Solar Water Heating.htm, NREL EL-May 1996)	33

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3-6 Pasif, Dolaylı Termosifon Sistem (Solar Water Heating.htm, NREL EL-May 1996).....	35
Şekil 3-7 Eziñç Metal firmasına ait düzlemsel toplayıcı kesiti	36
Şekil 3-8 Vakumlu cam boru yapım ayrıntıları	38
Şekil 3-9 Vakumlu tüp kollektör (Baymak)	39
Şekil 3-10 a-Si güneş pili iki diyotlu eşdeğer modeli. Iph ışık fotonlarının ürettiği akım, Inr rekombinasyon akımı, Ind difüzyon akımı, RSH şönt direnç, IRSH şönt dirençten geçen akım ve RS seri dirençtir. I ise bir yükün çektiği akım ve V üzerindeki gerilim düşümüdür.....	44
Şekil 3-11 a-Si güneş pili modelinden elde edilen hücre I-V eğrisi.....	48
Şekil 3-12 a-Si güneş pili modülünün I-V eğrisi (Üretici firma RWE Schott Solar'ın ASITHRU-30-SG için yayınladığı karakteristik eğri).....	49
Şekil 3-13 Hibrid sistemin modelinde varsayılan geometrik yapılandırma. C örtü, S güneş pili, A yutucu yüzey, F akışkan, L tüm sistemin uzunluğu, δ yutucu yüzey (kanatçık) kalınlığı, D borunun çapı ve W bir birimin genişliğidir.....	50

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3-14 31.03.1995'te az bulutlu bir günde Linde AG tarafından alınan ölçümler	52
Şekil 3-15 Titanium dioksit kaplamalı yutucu yüzey yapım ayrıntıları.	53
Şekil 3-16 Hibrid sistemin modelinde varsayılan geometrik yapılandırma. S güneş pili, p yutucu yüzey, F akışkan, L tüm sistemin uzunluğu, δ yutucu yüzey (kanatçık) kalınlığı, D borunun çapı ve W bir birimin genişliğidir.....	56
Şekil 3-17 Yutucu yüzey ve boru boyutları	60
Şekil 3-18 Akışkan üzerindeki enerji dengesi.....	65
Şekil 3-19 a) PV/T hibrid sistemin görünüşü, b) sistem şematik çizimi	70
Şekil 3-20 Pompa ile çalıştırılan PV/T hibrid sistemin şematik çizimi.	71
Şekil 3-21 PV/T kollektörün yapım ayrıntıları	72
Şekil 3-22 Sıcak su deposunun yapım ayrıntıları.....	72
Şekil 3-23 Verilerin saklanmasında kullanılan veri toplama ünitesi	76
Şekil 3-24	78

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3-25 Wheatstone Köprüsü	80
Şekil 3-26 R_x 'in bulunması	81
Şekil 3-27 Üç telli köprü devresi	82
Şekil 3-28 Sabit akım kaynağı ile dört telli direnç ölçümü kablo uzunluk sorunlarının olmadığı mükemmel bir doğruluk sağlar	83
Şekil 3-29 Pt-100 ile sıcaklık ölçümünde kullanılan Wheatstone köprüsü ve enstrümantasyon yükselteci ile köprü çıkış geriliminin 0-5V aralığına yükseltilmesi.	85
Şekil 3-30 MAX 4194 enstrümantasyon yükseltecinin iç yapısı.....	86
Şekil 3-31 Köprü devresinin MAX 4194'e bağlantısı.....	86
Şekil 3-32 Pt-100 ile sıcaklık ölçümünde kullanılacak sabit akım kaynağı devresi.....	88
Şekil 3-33 Pt-100 üzerindeki gerilim değişimlerini enstrümantasyon yükselteci ile 0-5 V gerilim değerine yükselten devre.....	89
Şekil 3-34 (a) Akım ve gerilim ölçümünde kullanılan devre ve yük dirençleri, (b) devre şeması.....	90
Şekil 3-35 Circulating Pumps CP 53 Pompa karakteristiği (Su sıcaklığı @20°C).....	91

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Şekil</u>		<u>Sayfa</u>
Şekil 3-36	Güneş modülü geçirgenliğinin ölçümünde kullanılan düzenek.....	92
Şekil 3-37	Pironometrelerin çıkışındaki düşük değerli gerilim değişimlerinin yükseltilmesi için kullanılan yükselteç devresi.....	92
Şekil 4-1	9.7.2004 günü için kollektör giriş (Tg) ve çıkış suyu (Tç) sıcaklıkları ile yüzey sıcaklıklarının (Ty1,Ty2) gün içindeki değişimi.	95
Şekil 4-2	12 Ağustos 2005 günü ölçülen kollektör giriş ve çıkış suyu, depo suyu, güneş modülünün ölçülen yüzey sıcaklıklarının ve ortam sıcaklıklarının zamana göre değişimi	100
Şekil 4-3	12 Ağustos 2005 günü gelen güneş ışınımı ve rüzgâr hızının gün içindeki değişimi	100
Şekil 4-4	PV/T sistemde güneş modülünün yüklü ve yüksüz durumlarda akım ve geriliminin zamana göre değişimi.	102
Şekil 4-5	PV/T sistemde güneş modülünün yüklü ve yüksüz durumlarda yüzey sıcaklığı ortalaması ile ortam sıcaklığının zamana göre değişimi.	102

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Şekil</u>		<u>Sayfa</u>
Şekil 4-6	PV/T sistemde güneş modülünün yüklü ve yüksüz durumlarında kolektör sıcaklıklarının zamana göre değişimi.....	103
Şekil 4-7	Güneş ışıınının zamana göre değişimi	103
Şekil 4-8	Güneş modülü ve termal toplayıcının ayrı çalıştırılması.....	105
Şekil 4-9	Termal toplayıcının giriş ve çıkış suyu ile depo suyu sıcaklıklarının zamana göre değişimleri.....	105
Şekil 4-10	Ayrık çalışan güneş modülünün akım ve geriliminin zamana göre değişimleri	106
Şekil 4-11	Ayrık sistemde farklı devir hızlarında çalışan pompanın kolektör ve depo suyu sıcaklıklarına etkisi	107
Şekil 4-12	19–23.12.2005 tarihleri arasında doğal dolaşımli olarak çalışan güneş kolektörü su sıcaklıkları.....	108
Şekil 4-13	Güneş modülü ile beraber çalışan, doğal dolaşımli PV/T sisteme ait kolektör suyu sıcaklıkları	109
Şekil 4-14	Zorlanmış dolaşımli PV/T sisteme ait kolektör suyu sıcaklıkları	110
Şekil 4-15	Azaltılmış sıcaklığın işlevi olarak PV/T sistemin ısıı verim eğrisi.....	115

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil

Sayfa

Şekil 4-16	Güneş modülünün veriminin hücre sıcaklığına bağlı olarak değişimi	116
------------	---	-----

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 2-1 Her panel için sıfır sıcaklıkta en küçük kareler yöntemiyle (LSF) tahminlenen verimler.	20
Tablo 2-2 Sandnes ve Rekstad'ın (2002) çalışmasına ait ölçülen verim değerleri, S: seri bağlı hücreler, P: paralel bağlı hücreler.	22
Tablo 2-3 Tripanagnostopoulos ve arkadaşları (2002) tarafından kurulan hibrid PV/T sistemlere ait verim değerleri, pc: polikristal, a: amorf silisyum, GL: cam örtü, REF: yansıtıcı. $\Delta T/G$ 'ye karşı çizdirilmiş elektriksel verim için eğrinin y eksenini kestiği değer verilmiştir.	23
Tablo 2-4 Huang ve arkadaşları (2001) tarafından yapılan çalışmada PV/T sisteme ait günlük ısı verim, elektriksel verim ve toplam verim değerleri.....	24
Tablo 2-5 Zondag ve arkadaşlarının (2002) yaptıkları modelleme çalışmalarından elde edilen verim değerleri.....	24
Tablo 3-1 Modülün Elektriksel Verisi	29
Tablo 3-2 Boyutlar ve ağırlık.....	29
Tablo 3-3 Karakteristik veri	29
Tablo 3-4 Hücre sıcaklık katsayıları	30
Tablo 3-5	77

ÇİZELGELER DİZİNİ (Devam)

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 3-6	79
Tablo 3-7 Sıcaklık çarpanları.....	87
Tablo 3-8 CP 53 pompasının elektriksel özellikleri	91
Tablo 4-1 9.7.2004 günü alınan kollektör giriş ve çıkış suyu sıcaklıkları ile güneş pili hücre sıcaklıklarının saatlik ortalamaları.	94
Tablo 4-2 25.12.2005 tarihinde sistemden alınan veriler ile meteorolojik veriler.....	113
Tablo 4-3 24.07.2004 günü için verim hesaplamaları	114
Tablo 4-4 Çalışmalar sonucunda elde edilen verim değerlerinin karşılaştırması	117

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

η_0	: Standart test koşullarındaki (STC) güneş pili verimi
η_e	: Elektriksel verim
η_{th}	: Isıl verim
$\eta_{th,0}$: Optik verim
η_{PVT}	: PV/T sistem verimi
η_{power}	: Konvansiyonel elektrik güç üretim santrali için elektrik güç üretim verimi
E_f	: Enerji tasarrufu verimi
I_b	: Güneş ışınımının direk difüz bileşeni (W/m^2)
I_d	: Güneş ışınımının direk difüz bileşeni (W/m^2)
I_T, G	: Toplam güneş ışınımı (W/m^2)
I_0	: Güneş pili karanlık akımı (A)
I_{0d}	: Difüzyon akımı (A)
I_{0r}	: Rekombinasyon akımı (A)
I_{MPP}	: Güneş pilinin maksimum güç noktasındaki akımı (A)
I_{PH}	: Güneş pilinin ürettiği foto-akım (A)
I_{PV}	: Güneş pilinden çekilen net akım (A)
I_{sc}	: Kısa devre akımı (A)
V_{MPP}	: Güneş pili maksimum güç noktasındaki gerilimi (V)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (Devam)

U_{oc}	: Açık devre gerilimi (V)
P_{MPP}	: Güneş pilinin maksimum güç noktasındaki gücü (W)
P	: Güç çıkışı (W)
R_s	: Yarıiletkenin üst yüzeyindeki ve yarıiletken arayüzü-metal kontakındaki seri direnç (Ω)
R_{SH}	: Güneş pilindeki yüksek-iletken yolları, kristaldeki bozulmaları, vb. ifade eden direnç (Ω)
n_d ve n_r	: Eğri düzeltme katsayıları
FF	: Dolgu faktörü
A_c	: Kollektör alanı (m^2)
A_{PV}	: Güneş modülü alanı (m^2)
\dot{m}	: Kütleli debi (kg/s)
C_p	: Özgül ısı (J/kgK)
T_a	: Ortam sıcaklığı (K)
T_b	: Kasa sıcaklığı (K)
T_C	: Güneş pili çalışma sıcaklığı (K)
T_{Cref}	: Güneş pili nominal çalışma sıcaklığı (NOCT) (K)
$T_{\dot{c}}$: Çıkış suyu sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_d	: Depo suyu sıcaklığı ($^{\circ}C$)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (Devam)

T_g	: Giriş suyu sıcaklığı (°C)
T_{gök}	: Gökyüzü sıcaklığı (K)
T_p	: Yutucu yüzey sıcaklığı (K)
T_{PVüstcam}	: Güneş modülü üst cam sıcaklığı (K)
T_{PValtcam}	: Güneş modülü alt cam sıcaklığı (K)
T_{red}	: Azaltılmış sıcaklık (m ² K/W)
F	: kanatçık verimi
F'	: Toplayıcı verim faktörü
F''	: Kollektör akış faktörü
F_R	: Isı kazanım faktörü
q	: Birim alandaki ısı enerjisi (J/m ²)
Q_u	: Toplayıcıdan elde edilebilecek yararlı ısı (J)
S	: Yutucu yüzey birim alanı tarafından absorbe edilen güneş enerjisi (J/m ²)
U_L	: Isı kayıp faktörü (W/m ² °C)
U_t	: Üst ısı kayıp katsayısı (W/m ² °C)
D, D_i	: Boru iç çapı (m)
L	: Akış yönündeki toplayıcı uzunluğu (m)
W	: İki kanatçık arası mesafe (m)
g	: Yerçekimi ivmesi (m/s ²)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (Devam)

h	: Isı iletim katsayısı (W/m ² K)
k	: Isıl iletkenlik (W/mK)
v_m	: kapalı döngüdeki ortalama akış hızı (m/s)
$v_{rüzgar}$: Rüzgâr hızı (m/s)
α	: Sıcaklık iletim katsayısı (thermal diffusivity) (m ² /s)
β'	: Hacimsel genleşme katsayısı (K ⁻¹)
β	: Kollektör eğim açısı (°)
δ	: Deklinasyon açısı (°)
$\alpha(\lambda)$: Yutma oranı
$\epsilon(\lambda)$: Yayma oranı
$\rho(\lambda)$: Yansıtma oranı
$\tau(\lambda)$: Geçirme oranı
μ	: dinamik viskozite (kg/ms)
ν	: kinematik viskozite (m ² /s)
σ	: Stefan-Boltzman sabiti (W/m ² K ⁴)
Nu	: Nusselt sayısı
Ra	: Rayleigh sayısı

1. GİRİŞ

Günümüzde güneş enerjisinden ısı enerjisi elde eden sistemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler sıcak su ihtiyacını karşılamak kadar iç mekân ısıtmasında da kullanılmaktadır. Güneş enerjisinden fotovoltaik dönüşüm ilkesinden yararlanılarak güneş pilleri aracılığıyla elektrik enerjisi de elde edilmektedir. Güneş pilleri tarafından soğurulan güneş ışınımının çoğu elektrik enerjisine dönüştürülmez ve hücre sıcaklığını artırarak elektrikselsel verimi düşürür. PV sıcaklığı uygun bir doğal yada zorlanmış akışkan dolaşımı ile yapılan soğutma aracılığıyla 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 hibrid güneş pili/termal toplayıcı (PV/T) sistemleri üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır.

Günümüzde kullanılan ticari güneş pilleri güneş enerjisini %20'den daha düşük bir verimle elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Elektrik enerjisine dönüştükten sonra gelen güneş enerjisinin %80'inden fazlası çevreye atılır (Huang ve arkadaşları, 2001). Enerji verimini artırmak için termal toplayıcılar fotovoltaik hücrelerle birleştirilerek düşük sıcaklıkta ısı ve elektrik enerjisi elde etmek üzere hibrid enerji üreteçleri olarak kullanılmaktadır. Güneş ışınımı, toplayıcı yutucu yüzeyi ile ısıl temasta bulunan fotovoltaik hücreler ile kısmen elektrik enerjisine dönüştürülür ve fotovoltaik hücrelerde oluşan fazla ısı termal sistemin girişi olarak görev yapar. Çalışma sırasında bir ısı taşıyıcı akışkan bu ısıyı yutucu yüzey ve hücrelerden uzaklaştırır. Isı taşıyıcı akışkan tarafından soğutulan bu güneş

pilleri, fotovoltaik dönüşüm verimi sıcaklığın doğrusal olarak azalan bir fonksiyonu olduğundan güneş pili güç çıkışını artıran düşük ve kararlı bir sıcaklıkta çalışır (Wysocki ve Pappaport, 1960; Saidov ve arkadaşları, 1995). Bu yolla, bu aygıt güneş enerjisini hem elektrik hem de ısı enerjisiye dönüştürmektedir (Sandnes ve Rekstad, 2002). Toplanan ısı, örneğin, evlerin, okulların ve işyerlerinin sıcak su veya ısınma gereksinimini karşılamak için kullanılabilir.

Hibrid PV/T sistemlerinin toplam enerji çıkışı (elektriksel artı ısı), güneş enerjisi girişi, ortam sıcaklığı, rüzgâr hızı, sistem bileşenlerinin çalışma sıcaklığı ve soğutma moduna bağlıdır. Elektriksel çıkış önceliklidir ve termal birimin çalışma koşulları buna bağlı olarak adapte edilmelidir (Tripanagnotopoulos ve arkadaşları, 2002).

Bu hibrid PV/T sistemin ana üstünlükleri şunlardır:

1. Hibrid PV/T sistemlerin kapladığı alandan üretilen elektrik ve ısı enerjisi, karşılık gelen alanın yarısının PV paneller ve diğer yarısının güneşli toplayıcılarla kaplanması durumunda elde edilecek enerjiden daha fazladır. Çatılarda daha az alan kaplaması açısından yararlıdır.

2. PV/T sistemler, mimari açıdan da ayırık PV ve ısı sistemlere oranla çatıda daha düzenli durmaktadır (Zondag ve arkadaşları, 2002).

3. Geçirgen örtü ve kasa her iki panelin ortak bileşenleri olduğundan ve birleşik bir sistemde paylaşıldıklarından dolayı güneş pili / termal (PV/T) toplayıcı ayırık termal ve PV panellerin bir arada kullanılmasına oranla daha ekonomiktir (Loferski ve arkadaşları, 1982).

4. Termal toplayıcı ile soğutma yapıldığından bir PV/T sistemdeki ortalama PV sıcaklığı ayırık bir PV modülün sıcaklığından daha düşük olabilir, dolayısıyla elektriksel verim de artar.

Güneş pili ve güneşli toplayıcının bir tasarımda birleştirilmesi her ikisinin de karakteristiğini değiştirmektedir. PV hücrelerin elektriksel çıkışı, toplayıcının giriş sıcaklığı ve – panelin ortama olan ısı kayıplarını azaltmak için ek bir cam örtüsünün bulunması durumunda – bu örtüdeki ek yansıma tarafından etkilenecektir (Zondag ve arkadaşları, 2002).

Bu tez çalışmasında yarı-saydam a-Si güneş pilinin TiO₂ kaplamalı yutucu yüzey ile birlikte kullanılmasıyla %10 oranında yutucu yüzeye güneş ışınımını geçirmesi sağlanmış ve diğer çalışmalardan farklı olarak PV/T sistemin ısı kısıminın enerji girişi artırılmıştır. Soğurma düzeyi %95'ten yüksek ve yama düzeyi %5'ten düşük olan selektif **TiNOX**® titanium yutucu yüzey ile daha yüksek ısı verim sağlanmıştır. Bu tezin getirdiği yenilik, yapılan iyileştirmeler sonucu PV/T sistemlerde termal toplayıcılara oranla ısı veriminin düşmesi sorununa bir çözüm önerisi getirmektedir.

Aynı zamanda özel sistem tasarımları yerine ticari olarak kullanılan PV modül ve termal toplayıcının kullanılması da PV/T sistemlerin yaygınlaşması çalışmasında öncülük eden araştırmacılara destek olacak ve maliyetin özel tasarımlara oranla daha düşük olmasından dolayı da bu sistemlerin fabrika üretimlerini cazip hale getirecektir.

Birleşik güneş pili ve termal toplayıcı kullanımı binaların çatısında daha az yer kaplayarak hem alan tasarrufu sağlamakta hem de elektrik enerjisinin yanı sıra sıcak su ihtiyacını da karşılayacaktır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Enerji verimini artırmak için pek çok araştırmacı hibrid PV/T toplayıcıları geliştirmeye çalışmıştır (Bergene ve Bjerke, 1993; Bergene ve Lovvik, 1995; Fujisawa ve Tani, 1997; Garg ve arkadaşları, 1990; Lalovik, 1986/87; Zondag ve arkadaşları, 2002, Sandnes ve Rekstad, 2002). PV/T kollektörler elektrik enerjisi üretir ve aynı zamanda sıcak su sağlar. Dolayısıyla toplam verim artar. Bergene ve Lovvik (1995) bir PV/T kollektörden teorik olarak elde edilebilecek toplam verimin %60-80 arasında olduğunu göstermiştir. Daha yeni test sonuçları (Fujisawa ve Tani, 1997) bir PV/T kollektörden elde edilebilecek ısı veriminin %60 civarında olduğunu göstermiştir. Ancak, ısı verimi için anılan sonuçlar sabit ve düşük giriş sıcaklığındaki akış koşullarında hesaplanan yada ölçülen anlık verimdir. 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. Bir PV/T sistemin günlük ısı verimi henüz çok açık değildir (Huang ve arkadaşları, 2001).

Bir güneşli toplayıcının ısı veriminin modellenmesi için gerekli bir çok bilgi bulunmaktadır. Konvansiyonel termal sistem tasarımı üzerine yapılan yayınlar birleşik fotovoltaik - termal toplayıcı tasarımı üzerine yapılan yayınlara oranla çoktur. En çok bilinen modelleme yöntemi 1958'de ortaya atılan Hottel-Whillier modelidir. Daha sonraları termal toplayıcıların dinamik modellenmesi ilgi çektiğinden bunun üzerinde çalışılmıştır. Üç dinamik modelin karşılaştırılması Klein ve arkadaşları (1974) tarafından yapılmıştır. Çalışma sıcaklığını elde etmek için ısındığı süre boyunca

toplayıcının verimini düşürerek bir depolama etkisi ve değişen hava koşullarına bağlı bir geçici etki tanımladılar (Zondag ve arkadaşları, 2002). Zondag ve arkadaşları (2002), oluşturdukları 3D dinamik modelin dinamik performansını Ekim ayında dış ortam koşullarında gün boyunca PV/T sistemin çıkışını simüle ederek test etmişlerdir. Ölçülen ve hesaplanan çıkış akışkan sıcaklıklarının birbirine yakınlığı modelin güvenilirliğini göstermiştir. 3D dinamik modelden elde edilen günlük çıkış değeri ile oluşturdukları 3D kararlı durum modelinden elde edilen günlük çıkış değeri Ağustos ayında açık ve güneş ışınımında salınımların olmadığı bir günde yapılan deneme sonuçlarına göre gün boyunca dinamik etkilerin ihmal edilmesi yalnızca %0.2'lik bir kayba neden olmuştur. Yapılan çalışmaların sonucuna göre, gün boyunca dinamik etkiler birbirini götürmektedir.

Hibrid PV/T sistemlerle ilgili yapılan bazı teorik ve deneysel çalışmalardan ilki, Kern ve Russel (1978), soğutma akışkanı olarak su veya havayı kullanarak sonuçlarıyla beraber bu sistemlerin ana fikirlerini verir. Hendrie (1979), konvansiyonel termal toplayıcı tekniklerini kullanarak PV/T sistemler üzerine bir teorik model sunar. Florschuetz (1979) PV/T sistemlerin analizi için Hottel-Whillier modelinin genişletilmiş bir şeklini öngörür ve Raghuraman (1981) sıvı ve havalı PV/T düzlemsel toplayıcıların performansını tahminleyen nümerik yöntemler sunar. Lalovik (1986) düşük maliyetli saydam tip a-Si hücreyi hibrid sistemler için bir gelişme olarak önermiştir. Loferski ve arkadaşları (1991) ve Prakash (1994) hava kütlesi akış hızı, hava kanalı derinliği ve güneş pilleri tarafından kaplanan yutucu yüzey alanı oranının (yüzey kaplama oranı) tek geçişli, Sopian ve arkadaşları çift geçişli, 1995 ve tek geçişli ve çift geçişli hibrid PV/T sistem performansı üzerine olan etkisini belirten sonuçlar sunmuştur, 1996. Ancak henüz PV/T verim hesaplamaları için oluşturulan çeşitli modellerin

sistematik bir karşılaştırması yapılmamıştır. Hibrid PV/T sistemlerin tasarım parametreleri üzerine daha fazla bilgi edinmek için birkaç model oluşturulmuş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Sonuç olarak, çalışmalar bazı deneysel çalışmaları içerdiği gibi (Fujisawa ve Tani, 1997; Garg ve arkadaşları, 1994; Lalovic ve arkadaşları, 1986) farklı kollektör tasarımları ve model parametreleri için performans sonuçları ve tahminleri veren teorik PV/T sistem modellemelerini de kapsamaktadır (Bergene ve Lovvik, 1995; Florschuetz, 1979; Sopian ve arkadaşları, 1996).

Yukarıdaki çalışmalarda hesaplanan sıvı tipi PV/T sistemlerin ısı verimleri %45 ile %65 arasındadır, daha yüksek değerler cam örtü ve hava aralığı kullanılarak ısı kayıplarını bastırıldığı sistemler için elde edilmiştir. Hava tipi PV/T sistemleri ele aldığımızda, ısı verim hava akış hızı, hava kanalı derinliği ve toplayıcı uzunluğuna oldukça bağlıdır. Teorik modellerde, daha yüksek hava akış hızları, küçük hava kanalı derinliği ve uzun PV/T sistemler için %55'lere varan ısı verimleri elde edilmiştir. Bu makalelerin çoğunda yüzey kaplama oranı önemli bir parametredir.

Takashima ve arkadaşları (1994) etkin PV soğutması yapabilmek için aralarında boşluk bırakarak bir PV panelinin güneş kollektörünün üzerine yerleştirildiği bir PV/T sistem önermiştir. Bergene ve Lovvik (1995) elektriksel ve ısı verimlerinin sonuçlarını verdiği sıvı tipi hibrid PV/T sistemin farklı bileşenleri arasındaki enerji transferi üzerine ayrıntılı bir analiz yapmıştır. Tek ve çift cam örtülü PV/T hava ısıtma sistemlerinin ele alındığı çalışmaların kararlı durum simülasyon sonuçları Garg ve Adhikari'nin (1997) çalışmalarında verilmiştir. PV/Termal birleşik bina

elemanları olarak hibrid PV/T sistemlerin önerilmesi Imre ve arkadaşları (1993), hibrid PV-bina entegrasyonunun öneminin vurgulanması Posnasky ve arkadaşları (1994) tarafından yapılmıştır. Bina çatı ve terası kaplama malzemesi olarak PV panellerin kullanıldığı parametrik çalışma Brinkworth ve arkadaşları (1997) tarafından sunulmuştur. PV/T sistemler üzerine yapılan yeni yayınlarda Hauser ve Rogash (2000) tarafından bina ön duvarları üzerine yerleştirmek için geliştirilmiş ve ılık su sağlayan gizli ısı depolama üzerine kurulu sistemler hakkındaki yeni buluşlar sunulmaktadır. Krauter ve arkadaşları da (1999) PV panelleri duvar kaplama malzemesi olarak kullanmak için yaptıkları çalışmada PV panelin sadece ısı yalıtımıyla kullanıldığı, doğal hava dolaşımıyla, zorlanmış hava ve su dolaşımıyla soğutulduğu 4 sistemi incelemiştir. İnceleme sonuçlarına göre, su soğutmalı PV/T sistemde PV hücrelerdeki sıcaklık düşüşünün dolayısıyla elektriksel verimdeki artışın en fazla olduğunu göstermişlerdir.

Yukarıdaki çalışmalarda, ısı verimleri sıvı-soğutmalı PV-modül için %70 ve hava-soğutmalı PV-modül için %60'lara çıkarmayı amaçlayan birkaç uygulama yapılmıştır. Thomas ve arkadaşları (2000) tarafından ABD'de geliştirilen ticari PV/T sistemler ve Huang ve arkadaşları (2001) tarafından geliştirilen PV modülü sıcak su deposuyla birleştiren sistem de yeni yapılan yayınlarda sunulmaktadır.

Hibrid PV/T sistemlerin elektriksel ve ısı çıkışı Al-Baali (1986) tarafından önerildiği gibi düşük yoğunlaştırma oranına sahip güneş ışınımı yoğunlaştırıcıları ile artırılabilir. Düzlemsel yardımcı yansıtıcıların kullanıldığı hibrid PV/T sistemlerin ısı ve elektriksel performansını tahminleyen teorik modellemeler Garg ve arkadaşları (1991), CPC yansıtıcılar ile Garg ve Adhikari (1999) tarafından yapılmıştır. Bu sistemler

hava ile ısının uzaklaştırılmasına dayanmaktadır ve yazarlar düşük maliyetli yoğunlaştırıcılar yerine yüksek maliyetli hücrelerin kullanılmasını önermektedirler. Broggen ve arkadaşları (2000) çalışmalarında $4 \times$ CPC yansıtıcılar ile birlikte su-soğutmalı PV/T sistemlerin kullanılması durumunda elektriksel çıkışın yıllık %20 arttığını gösteren sonuçları vermektedir. Yoğunlaştırıcı PV/T sistemleri ile PV modül kısmının maliyetinde bir azalma olmaktadır, fakat sürekli güneşi izlemesi gerektiğinden binalarda kullanım açısından oldukça karmaşık olmaktadır. Daha yüksek güneş enerjisi girişi sağlamak amacıyla sabit yardımcı ayna yansıtıcılar daha ucuz bir seçenek olmasına rağmen PV modüllerle kullanılması pek uygun değildir, çünkü yansıyan güneş ışınımı PV yüzeyinde eşit dağılmadığından sistemin verimi düşmektedir. Tripanagnostopoulos ve arkadaşları (2002) tarafından yapılan bir çalışma ise su-soğutmalı PV/T sistemlerde yardımcı yayınlık yansıtıcılar kullanılması ile elektriksel verimin %25 - %35 ve ısı veriminin %20 oranında arttığını gösteren sonuçlar bulunmaktadır.

Toplayıcının tamamının tasarımını optimize etmek için olduğu kadar toplayıcı bileşenlerindeki küçük iyileşmeler için de doğru bir nümerik model gereklidir.

Türkiye’de hibrid PV/T sistem ile ilgili çalışma Güneş Enerjisi Enstitüsü’nde Prof.Dr. Metin Çolak’ın danışmanlığında Dr. Kubilay Erkaya tarafından 1998 yılında tamamlanan bir doktora tezinde yapılmıştır. Bu çalışmada ısı taşıyıcı akışkan olarak suyun kullanıldığı termal toplayıcı ile güneş pili arasındaki açıklık mesafesi değiştirilerek aynı zamanda hava dolaşımı ile de hücre sıcaklığı düşürülmüştür. Bunun sonucu olarak güneş pilinin veriminde artış olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda hibrid

PV/T sistemin toplam veriminin ~%20 olduğu gösterilmiştir (Erkaya, K., olak, M., 1998).

Bjornar Sandnes ve John Rekstad tarafından yapılan bir çalışmada birleşik bir guneş pili / termal (PV/T) toplayıcı tek-kristal silisyum hücresinin siyah plastik ısı yutucu yüzeyin üzerine yapıştırılmasıyla oluşturulmuştur (Sandnes ve Rekstad, 2002). Güneş pili ve plastik yutucu yüzeyin ısıl genleşme katsayıları arasındaki farkı soğuracak kadar 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 düzenlenmiştir ve toplam PV birim alanı 0.32m²'dir. Yutucu yüzey sıcaklığı akış yönünde artar. Bu sistemde 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 akım çıkışındaki farklılığı azaltarak hücreler seri bağlandığında toplam verimin artmasına neden olmaktadır. PV/T sistemde kullanılan termal toplayıcı SolarNor AS, Oslo Üniversitesi ve General Electric Plastics tarafından geliştirilmiştir. Modifiye polyphenylenoxid (PPO) plastikten yapılmış yutucu yüzeyin içinde seramik tozlarıyla doldurulmuş kare şeklinde duvar duvara temas halindeki iç kanallar yutucu yüzeyin arka tarafının tamamını kaplayarak homojen bir sıcaklık dağılımı sağlar. Isı taşıyıcı akışkan (su) toplayıcının bir iç dağıtım kanalına doğru pompalanmakta ve yerçekimi ivmesiyle paralel yutucu kanallardan aşağıya doğru akmaktadır. Suyun seramik parçacıklar arasındaki boş hacmi doldurup üstteki yutucu tabaka ile temas ettirilerek yutucu yüzeyden ısı

taşıyıcı akışkana doğru iyi bir ısı taşınımı sağlaması amaçlanmıştır. Bu özel tasarım deney düzeneğinde ölçülen parametreler güneş ışınımı I , depo sıcaklığı T_d , ortam sıcaklığı T_a , PV hücre sıcaklıkları ve yutucu yüzey sıcaklığıdır. PV/T ısı verimi, η_{th} , iyi yalıtılmış deponun bir kalorimetre görevi gördüğü sistemin enerji dengesi analizi yapılarak hesaplanmıştır. Fotovoltaik enerji dönüşümü verimi, η_e , farklı sıcaklıklarda, 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 elektrik gücü çekilmesi termal toplayıcı için güneş enerjisi girişini ve dolayısıyla ısı verimi yaklaşık %10 oranında azalttığı gözlemlenmiştir. Bir PV/T sistem, siyah yutucu yüzeyli ‘saf’ termal sistem (T) ile karşılaştırılarak PV/T sistemin ısı veriminde aşağıdaki nedenlerden dolayı azalma olduğu gösterilmiştir:

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

Diğer taraftan güneş pilleri seçici yüzeyler olarak davrandığı için PV/T sistem kollektörden olan ısı kayıplarını azaltmaktadır. Cam örtülü PV/T sistemde (PV/T_g) ise kullanılan ek bir cam örtü bu ısı kayıplarını daha da azaltmakla beraber yansıma kayıplarını artırmaktadır. Güneş pilini

soğutmak amacıyla kollektör düşük sıcaklıkta çalıştırılmış, bu da PV verimini artırmıştır. Güneş pili sıcaklığı, sistem sıcaklığı (giriş suyu sıcaklığı) ve toplayıcı ısı taşınım karakteristiği ile sıkıca ilişkilidir. Birleşik PV/T sistem gerekli soğutma etkisini yaratmak için yeteri kadar düşük sıcaklıklarda çalıştırılmalıdır. PV/T sistem için geliştirilmiş analitik model ile yapılan simülasyon sonuçlarına göre, hücrelerin soğutulduğu ve soğutulmadığı durumlarda fotovoltaiik güç çıkışında simülasyonun yapıldığı günün sonunda 8.9 Wh'lik net bir kazanç elde edilmektedir. Bu da, soğutma yapılmadığı duruma oranla PV enerji çıkışında %8.8'lik bir artışa karşılık gelmektedir.

Literatürde hibrid PV/T sistemler üzerine yapılan bir başka çalışma ticari pc-Si PV modüllerin ve soğutma akışkanı olarak suyun (model pc-PV/SU) kullanıldığı bir model üzerine kurulmuştur (Tripanagnostopoulos ve arkadaşları, 2002). Aynı zamanda daha düşük elektriksel verime sahip a-Si PV modül tipi hibrid sistemler de kullanılmıştır. pc-Si ve a-Si tipi PV modüllerden ısının uzaklaştırılması için havanın kullanıldığı hibrid sistemler (sırasıyla pc-PV/HAVA ve a-PV/HAVA modelleri) kurulup denenmiştir. Toplam enerji çıkışını artırmak amacıyla, pc-Si modül tipi temel hibrid sistemler (PV/SU ve PV/HAVA), bu sistemlerle ek cam örtüler (PV/SU+GL ve PV/HAVA+GL), yardımcı yayınlık yansıtıcılar (PV/SU+REF ve PV/HAVA+REF) ve birlikte kullanıldığı sistemler (PV/SU+GL+REF ve PV/HAVA+GL+REF) üzerinde çalışmışlardır. Hibrid PV/T sistemlerle yardımcı yayınlık yansıtıcıların birleşiminin bu sistemlerin maliyet açısından etkin performansını artıracığı öne sürülmektedir. 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. Yazarlar 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) fotovoltaiik modül olarak a-Si ve pc-Si PV'nin kullanıldığı hibrid 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 yayınlık yansıtıcılar kullanılması ise daha yüksek elektriksel verim ve makul bir ısı verim elde edilmesini sağlamıştır. Her ikisinin birden kullanımı ile ısı verimi artırırken sistemin elektriksel çıkışı yeterli düzeyde kalmıştır. Soğutma akışkanı olarak suyun kullanıldığı PV/SU sisteminde elektriksel verimin PV/INSUL'den %13.3 ve PV/FREE'den %3.2 daha fazla olduğu görülmüştür.

PV/T kolektörler elektrik enerjisi üretir ve aynı zamanda sıcak su sağlar. Dolayısıyla toplam verim artar. Yapılan çoğu teorik ve deneysel çalışmalarda ısı verim için anılan sonuçlar sabit ve düşük giriş sıcaklığındaki akış koşullarında hesaplanan ya da ölçülen anlık verimdir. Huang ve arkadaşları (2001) tarafından yapılan çalışmada bir su tankı eklenerek PV/T sistem su ısıtmak için kapalı bir sistemde kullanılarak, gün boyunca değişen giriş sıcaklığı ölçülmüş ve ısı verim günlük test sonuçlarına göre belirlenmiştir. Bu çalışmada Huang ve arkadaşları bir PV/T sisteminde su ısıtma için entegre tasarım modeli, diğer bir deyişle entegre PV/T sistem (IPVTS) ele almışlardır. İyi bir kalite kontrol ve toplu üretim dolayısıyla azalan maliyet ile IPVTS'in tamamı fabrikada üretilebilir. Konvansiyonel güneşli su ısıtma sistemlerinin aksine su bağlantılarının yapılması dışında yerinde montaja gereksinim duymadığından montaj giderleri neredeyse yoktur. Bunun yanı sıra IPVTS ile kurulum için gerekli alan azaldığı gibi PV ve termal toplayıcı birimlerinin tek bir kasada birleşik olmasından dolayı bu gider de düşmektedir. Gösterim amaçlı olarak, bir

IPVTS tasarlayarak günlük-verim test yordamını kullanarak termal toplayıcı su ısıtma sisteminin ısı verimini ölçmüşlerdir. Bir IPVTS'in tamamının değerlendirilmesi birincil-enerji tasarrufu modeli kullanılarak yapılmıştır. Pek çok araştırmacı gibi, Huang ve arkadaşları da PV/T sistemler için verimi “ısı verim artı elektriksel verim” tanımını kullanarak değerlendirmiştir.

Elektrik enerjisi ısı enerjiden dönüştürüldüğünden yüksek dereceli enerji formudur. Dolayısıyla, birincil-enerji tasarrufu açısından bir PV/T sistemin enerji tasarrufunu değerlendirebilmek için enerji tasarrufu verimi olarak adlandırdıkları bir tanım yapmışlardır.

$$E_f = \frac{\eta_e}{\eta_{power}} + \eta_{th} \quad (2-1)$$

η_e PV'nin elektrik güç üretim verimi; η_{power} konvansiyonel bir elektrik güç üretim santrali için elektrik güç üretim verimi; η_{th} PV/T sistemin ısı toplama verimidir. Bu çalışmada η_{power} 0.38 olarak alınmıştır. Basitlik için konvansiyonel ısıtma sistemlerinin verimini %100 olarak almışlardır. Huang (1993) tarafından günlük başlangıç su sıcaklığı düşük olan çoğu güneşli su ısıtıcıları için günlük verim 0.50 civarında olarak bulunmuştur. Bu değer bir PV/T sistemin toplam performansının denetlenmesi için bir ölçüt oluşturacaktır. Bir PV/T sistem için birincil-enerji tasarruf verimi E_f 'nin bir güneşli su ısıtıcı sistemi ile yarışabilmesi için 0.50'yi geçmesi gerektiği beklenmektedir. Bu çalışmada yapılan PV/T toplayıcı ticari poli-kristal PV modülü ve ısı toplayıcı bir yüzeyden oluşmaktadır. Isı toplayıcı plaka doğrudan ticari PV modülün arka yüzeyine yapıştırılır. Daha iyi bir temas sağlamak için plaka ve PV modül arasında

ısı yağ ve ısı yalıtım için PU ısı yalıtım tabakası kullanılmıştır. Bu çalışmada $W/D = 6.2$ ve 10 olan iki tip plaka arası boru (tube-and-sheet) kullanılmıştır (Huang ve arkadaşları, 1999). İlki ($W/D=6.2$) oluklu alüminyum plakadan oluşmakta, diğeri ($W/D=10$) ısı iletken bir yapıştırıcı kullanılarak alüminyum plakaya birleştirilmiş bir bakır boru kullanılmaktadır. Ancak, bu iki ısı toplayıcı ile PV/T toplayıcıların performansı tatmin edici değildir. Dolayısıyla, ısı toplayıcı plaka içindeki akış kanalları $W/D=1.0$ olmak üzere polikarbonat malzemeden yapılmış oluklu bir plaka kullanarak bir ısı toplayıcı plaka tasarlanmıştır. Bir IPVTS ilk önce PV/T toplayıcı ile 50 mm kalınlığında PU köpük ile yalıtılmış su depolama tankı ile birleşik üretilmiştir. Isı toplayıcı plakanın ısı iletim katsayısını iyileştirmek için suyu tanktan PV/T toplayıcıya doğru dolaştırabilmek için $3W$ DC pompa kullanılmıştır. Bir güneşli su ısıtıcısı için, ortam sıcaklığı, T_a , güneş ışınımı, G , ve güneş kolektörünün ısı parametreleri (ışınım ısı yutma katsayısının taşınım ile ısı kaybına oranı) ile orantılı kritik bir giriş suyu sıcaklığı, T_g^+ , vardır (Duffie ve Beckman, 1980). Su depolama tankının içindeki sıcaklık, $T_d (= T_g)$, T_g^+ 'dan daha yüksek olduğunda termal toplayıcı güneş enerjisi absorpsiyonu için negatif verime sahip olacaktır. Bu koşulda, pompa kapatılmalıdır. Zorlanmış dolaşımli güneşli sıcak su sisteminde, bir ΔT kontrol aygıtı tanktaki ve toplayıcı çıkışındaki sıcaklık farkını algılayarak pompayı kontrol etmelidir. Deney için bir bilgisayar aracılığı ile ΔT kontrol aygıtı $7^\circ C$ AÇIK ve $3^\circ C$ KAPALI şeklinde ayarlanarak DC pompayı doğrudan kontrol edebilir. IPVTS'te tankta depolanan suyun hacmi, $V_t / A_c = 82 \text{ lt} / \text{m}^2$ olacak şekilde, 45 lt 'dir. IPVTS konvansiyonel güneşli sıcak su sistemleri için standart test koşullarında test edilir (Huang ve Du, 1991). Ayrı bir ölçümden elde edilen PV modül güç üretim verimi 0.09 'dur. Huang ve arkadaşları (2001) tarafından yapılan bu çalışmada ticari bir polikristal

PV modül kullanılarak integral-tip bir PV/T toplayıcı sistemi (IPVTS) geliştirilmiştir. IPVTS'nin ısı veriminin belirlenmesi için termal toplayıcılar için kullanılan test yöntemleri kullanılmıştır. Oluklu bir polikarbonat panelden yapılmış PV/T toplayıcıdan depo suyu ve PV modül arasındaki çok benzer sıcaklıklarda (4°C farkla) iyi bir ısı verim elde edildiği sonucuna varılmıştır. PV/T toplayıcının iyi bir ısı iletim tasarımı, fark sıcaklık kontrol aygıtının daha iyi tasarımı ve PV modül ile ısı toplayıcı plakanın daha iyi birleştirilmesi ile IPVTS'nin performansında iyileşme sağlanabilir. Test sonuçlarına göre bir IPVTS'nin birincil enerji tasarruf verimi 0.60'ı geçmektedir ki bu da tek bir termal toplayıcı veya tek başına bir PV sistemin performansından daha iyidir. Karakteristik günlük verim $\eta_s^* 0.38$ 'e ulaşmaktadır. Bu değer, bir örtülü toplayıcı konvansiyonel su ısıtıcısının veriminin yaklaşık %76'sına karşılık gelmektedir ($\eta_s^* = 0.50$). Isı toplayıcı plakanın PV hücrelerle doğrudan ısı temasta bulunması ile PV/T toplayıcının performansı iyileşebilir. PV/T sistemin elektriksel ve ısı dönüşümü içeren toplam performansı pek çok etmenden etkilenmektedir. Isıl verim su sıcaklığındaki artışla azalmaktadır. Sıcak su gibi gereksinimleri karşılama uygulamalarında kullanılacak olan sıcak suyun sıcaklığının artması PV sistemin güç üretim verimini de düşürmektedir. Bunun yanı sıra, ısı enerji elde etme ile elektrik gücü üretiminin birim maliyetleri de farklıdır. Ekonomik fizibilite de dahil olmak üzere sistem optimizasyonu için birim harcama başına enerji kazancını dikkate alan yeni bir maliyet fonksiyonu gereklidir. Belirli bir PV/T sistem tasarımı için meteorolojik veriyi kullanan sistem simülasyonu birim harcama başına toplam birincil enerji kazancına dayanan optimum sistem tasarımı için yardımcı olacaktır.

Bir hibrid PV/T sistemin verimini belirleyebilmek için Eindhoven

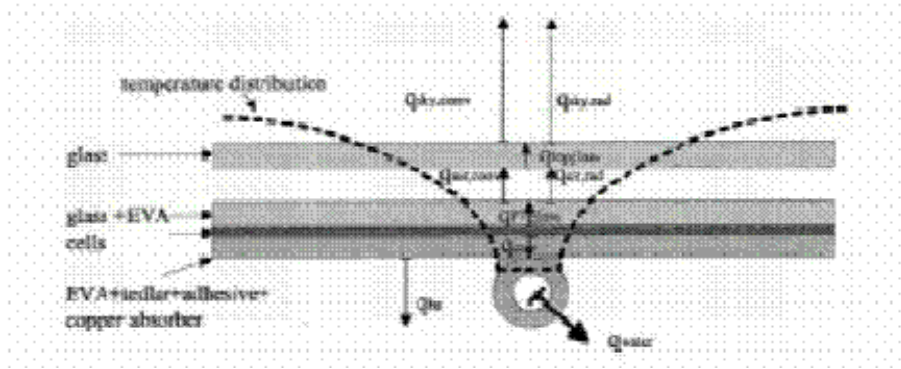
University of Technology'de (de Vries, 1998; de Vries ve arkadaşları, 1999) Zondag ve arkadaşları (2002) tarafından bir deneysel prototip kurulmuştur. Bu optimize edilmemiş ilk prototip çalışılan modeller tarafından üretilen simüle edilmiş değerleri geçerli kılabilmek için kurulmuş ve çok-kristal yapıya sahip silisyum hücrelerden oluşan PV modül bir cam örtülü termal toplayıcıya bağlanarak oluşturulmuştur. Hibrid PV/T sistemin verimi ölçülmüş ve test düzeneğinde yan yana konulan boyuttaki bir termal toplayıcı ve çok-kristal silisyum PV modülün verimleriyle karşılaştırılmıştır. Su, termal toplayıcı ve PV/T sisteme pompa ile tanktan çekilmektedir. PV modül 72 adet $10 \times 10 \text{ cm}^2$ çok-kristal silisyum hücrelerden oluşan düşük-demir katkılı cam örtülü bir modüldür. Standart koşullarda (1000 W/m^2 , 25°C) bu kapalı hücrenin verimi tipik olarak %13, 25°C 'ta modülün verimi ise %9.7'dir. Termal toplayıcı yutucu yüzeyi bir bakır plakaya lehimlenmiş bakır spiralden oluşan sheet-and-tube standart termal toplayıcıdır. İki komşu boru arasındaki mesafe 10cm ve boru çapı 1 cm'dir. Yutucu yüzey PV modül ile kaplı olduğu için toplayıcı yüzeyinin spektral seçiciliği bozulmuştur.

Zondag ve arkadaşlarının (2002) yaptıkları çalışmada PV/T sistem için geliştirdikleri modeldeki ısı akışı Şekil 2-1'de gösterilmiştir. PV/T sistemin günlük çıkışı belirlemek için bu ısı akışlarını hesaplayan dinamik ve kararlı durum 3D modeli, 2D modeli ve 1D modeli olmak üzere dört nümerik model geliştirmişlerdir. Ölçümlerin ve hesaplamaların sonuçları toplayıcının çıkışı ve verimini vermektedir. Toplayıcının çıkışı üretilen yararlı enerji olarak tanımlanırken verim toplayıcı çıkışının toplayıcıya gelen güneş enerjisi miktarına oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemden

hem elektriksel hem de termal çıkış alındığından dolayı her ikisinin de verimleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\eta_e = \frac{P_{MPP} \cdot V_{MPP}}{G \cdot A_{PV}} \quad (2-2)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m} C_p (T_c - T_g)}{G \cdot A_{PV}} \quad (2-3)$$



Şekil 2-1 PV/T sistemin kesiti. PV/T sistemdeki malzeme katmanları ile sıcaklıklar ve çeşitli ısı akıları gösterilmektedir. Kesikli çizgi panelin yüzeyindeki sıcaklık dağılımını göstermektedir.

Dört model hesaplanan optik ve elektrik parçaları açısından ortaktır.

Sıcaklığın bir işlevi olarak elektriksel verim şu şekilde tanımlanmıştır:

$$\eta_e = \eta_0 (1 - 0.0045 [T_{hücre} - 25^\circ C]) \quad (2-4)$$

Deneysel verim eğrilerini belirleyebilmek için PV/T sistem prototipi üzerinde ölçümler yapılmıştır. PV/T sistem prototipi ve termal toplayıcı için ölçülen verim eğrileri Şekil 2-2'de ve sıfır sıcaklıktaki (zero reduced temp.)

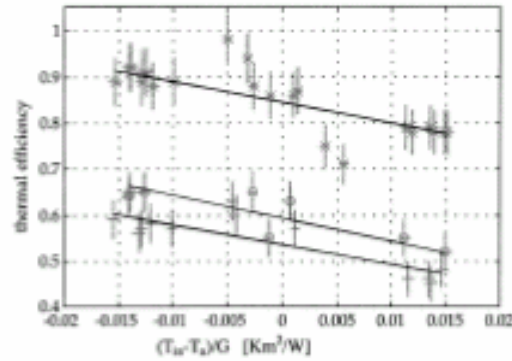
karşılık gelen verimleri Tablo 2-1’de verilmiştir. Isıl verim azaltılmış sıcaklığın bir işlevi olarak gösterilmiştir:

$$T_{red} = (T_g - T_a) / G \quad (2-5)$$

Şekil 2-2 sıcaklığın bir işlevi olarak verimin bu sıcaklıkla doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Termal toplayıcının verimi aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\eta_{th} = P / G \cdot A = F_R (\alpha\tau - \tau\eta_e) - F_R \cdot U_L \cdot T_{red} \quad (2-6)$$

Burada F_R ısı kazanım faktörüdür ve tipik olarak değeri 0.83 ± 0.01 ’dir, dolayısıyla “zero reduced” sıcaklık ve sıfır elektriksel verim için verim 0.6’dır ve $\tau\alpha$ ’nın değeri 0.72 ± 0.02 olur, ki bu da modellerde kullandıkları hesaplanmış 0.74 değerine çok yakındır. Kayıp katsayısı $5.2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ’dir, ki bu da 1D modelinde hesaplanan $5.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ değerine yakındır.

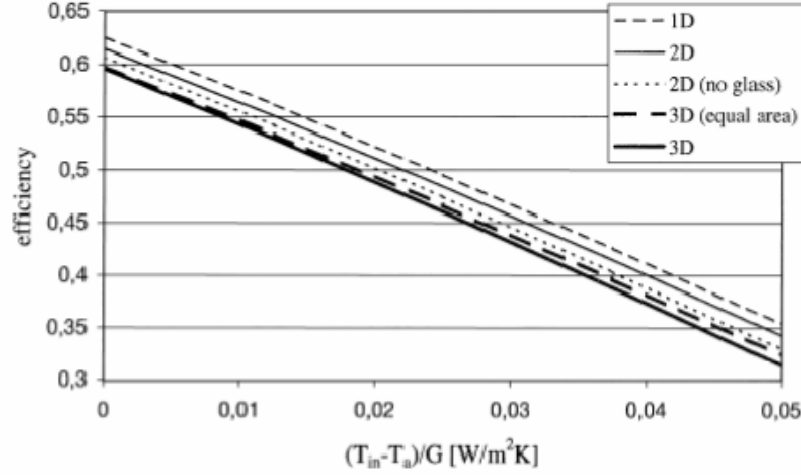


Şekil 2-2 Termal toplayıcının (PV/T sistemin elektrik üretimi olmadan ve elektrik üretirkenki ölçülen ısı verimi (x). Ölçümlerdeki belirsizlikler çubuk uzunluklarıyla gösterilmiştir.

Tablo 2-1 Her panel için sıfır sıcaklıkta en küçük kareler yöntemiyle tahminlenen verimler.

Panel	Veri sayısı	Optik verim ($\eta_{th,0}$)
Termal toplayıcı	22	0.84±0.01
Elektrik çekilmediğinde PV/T sistem	8	0.59±0.015
Elektrik çekildiğinde PV/T sistem	12	0.54±0.015

2D modeli ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Hesaplamalar standart ortam koşullarda yapılmış ve simülasyon sonuçlarına göre 2D kararlı durum modeli için ısıl verim azaltılmış sıcaklığın bir işlevi olarak bulunmuştur. Model ve deneysel sonuçlar deneysel veri aralığı içinde iyi bir uyuma göstermiştir. Sonra, 1D, 2D ve 3D kararlı durum modelleriyle hesaplanan ısıl verim karşılaştırılmıştır. Simülasyonlar elektrik üretilmediği durum için yapılmıştır. Sonuçlar Şekil 2-3'te verilmiştir. Şekil, 1D ve 2D modelinin sonuçlarının kabaca %1 oranında farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. 2D ısıl modeline göre 3D ısıl modeli %2 daha düşük verim tahminlemektedir. Ancak, şekilden 2D ve 3D modeli arasındaki %2'lik farkın büyük bir kısmının 3D modelinde camdaki ısıl direncin olmamasından kaynaklandığı görülmektedir. Dolayısıyla, Zondag ve arkadaşları tarafından modellerin sonuçları arasında iyi bir uyuma olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 2-3 1D, 2D ve 3D termal modellerinin elektrik üretimi olmadığı durum için karşılaştırılması.

Dinamik 3D modeli ve kararlı durum 3D, 2D ve 1D modelleri PV/T hibrid sistemin optimize edilmemiş ilk prototipi ile beraber kurulmuştur. Modellerden elde edilen verim eğrileri veri aralığında deneysel olarak elde edilen eğrilerle iyi bir uyuma göstermiştir. Verim eğrilerinin ve günlük ve yıllık çıkışların belirlenmesinde basit kararlı durum 1D modeli yeterli olurken, daha karmaşık modellere oranla hesaplama süresi de azalmaktadır. Günlük çıkışın hesaplanmasında da dinamik etkilerin ihmal edilmesiyle yapılan hatanın çok küçük olduğu bulunmuştur. Aynı koşullar altında, konvansiyonel termal toplayıcı için %54 ve konvansiyonel PV modül için %7.2 olan ısı ve elektriksel verimler kullanılan konfigürasyon için sırasıyla %33 ve %6.7 olarak bulunmuştur. 1D modelinin üstünlüğü, 3D modelinden 25 kat daha hızlı olan 2D modelinden de yaklaşık 30 kat daha hızlı olmasıdır. 1D modeli 2D modeli kadar iyi bir başarıma sahipse de, 2D ve 3D modellerinin daha esnek olması ve daha karmaşık PV/T sistem tasarımlarına kolayca adapte edilebilir olmalarından dolayı 1D modeline

bazı önemli üstünlükleri bulunmaktadır. Dolayısıyla, 2D ve 3D modelleri, Zondag ve arkadaşları tarafından sürdürülen araştırmanın ana hedeflerinden biri olan PV/T sistem optimizasyonu için büyük önem taşımaktadır.

Yukarıda açıklanan çalışmalar farklı şekillerde tasarlanmış termal kolektörlere entegre farklı teknolojilerle üretilmiş güneş pilleri ile tasarlanmış olmakla birlikte elektriksel verim, ısı verim ve PV/T hibrid sistem verim değerleri karşılaştırması incelenen çalışmalardan dördü için yapılmıştır. Bu çalışmalarda termal verimler $(T_g - T_a) / G'$ 'ye karşı çizdirilmiş olup çoğunlukla verim için eğrinin y eksenini kestiği değer olan $F_R(\tau\alpha)$ (optik verim, $\eta_{th,0}$) verilmiştir. PV/T sistemlerin karşılaştırılabilmesi için belirli standart test koşulları bulunmadığı için ve yukarıda bahsedilen nedenlerle çalışmaların birbirleriyle karşılaştırılmaları oldukça zordur – ki literatürde bu şekilde karşılaştırmalı analizler bulunmamaktadır.

Sandnes ve Rekstad'ın (2002) çalışmasına ait ölçülen verim değerleri Tablo 2-2'de sunulmuştur. $\Delta T/G'$ 'ye karşı çizdirilmiş elektriksel verim için eğrinin y eksenini kestiği değer verilmiştir.

Tablo 2-2 Sandnes ve Rekstad'ın (2002) çalışmasına ait ölçülen verim değerleri, S: seri bağlı hücreler, P: paralel bağlı hücreler.

PV	η_e (%)	PV/T Sistem	$\eta_{th,0}$ (optik verim)
S, T=18°C	13.3	Saf termal	0.87
P, T=18°C	13.4	Örtüsüz PV/T	0.77
S, T=52°C	10.9	Cam örtülü PV/T	0.84
P, T=52°C	9.9		

Tripanagnostopoulos ve arkadaşları (2002) tarafından hibrid PV/T sistemler üzerine yapılan çok sayıdaki çalışmalarda ise ticari pc-Si PV veya

a-Si PV modüller, soğutma akışkanı olarak su veya hava kullanılmış ve cam örtü ve/veya yayınlık yansıtıcılar kullanılmıştır. Bu çalışmalara ait verim değerleri $\Delta T / G$ 'nin bir fonksiyonudur (Tablo 2-3).

Tablo 2-3 Tripanagnostopoulos ve arkadaşları (2002) tarafından kurulan hibrid PV/T sistemlere ait verim değerleri, pc: polikristal, a: amorf silisyum, GL: cam örtü, REF: yansıtıcı. $\Delta T / G$ 'ye karşı çizdirilmiş elektriksel verim için eğrinin y eksenini kestiği değer verilmiştir.

PV/T Sistem	η_e	η_{th}
pc-PV/SU	0.12	0.55-11.99($\Delta T / G$)
a-PV/SU	0.06	0.60-12.02($\Delta T / G$)
pc-PV/HAVA	0.12	0.38-9.33($\Delta T / G$)
a-PV/HAVA	0.06	0.46-10.69($\Delta T / G$)
PV/SU	0.12	0.55-11.99($\Delta T / G$)
PV/SU+GL	0.10	0.71-9.04($\Delta T / G$)
PV/SU+REF	0.15	0.66-11.89($\Delta T / G$)
PV/SU+GL+REF	0.12	0.80-9.03 ($\Delta T / G$)
PV/HAVA	0.12	0.38-9.33($\Delta T / G$)
PV/HAVA+GL	0.10	0.59-7.88($\Delta T / G$)
PV/HAVA+REF	0.15	0.60-12.68($\Delta T / G$)
PV/HAVA+GL+REF	0.12	0.75-8.89($\Delta T / G$)

Huang ve arkadaşları (2001) tarafından yapılan çalışmada PV/T sisteme bir su tankı eklenerek bu kapalı sistemde gün boyunca değişen giriş sıcaklığı ölçülmüş ve diğer çalışmalardan farklı olarak ısı verim günlük test sonuçlarına göre belirlenmiştir. Sistemin toplam verimi 0.38 olarak ölçülmüştür. Farklı günlerde alınan değerlere göre hesaplanan ısı, elektriksel ve toplam verim Tablo 2-4'te verilmiştir.

Tablo 2-4 Huang ve arkadaşları (2001) tarafından yapılan çalışmada PV/T sisteme ait günlük ısı verim, elektriksel verim ve toplam verim değerleri.

η_{th}	η_e	η_{PVT}
0.385	0.09	0.475
0.411	0.09	0.501
0.372	0.09	0.462
0.363	0.09	0.453
0.271	0.09	0.361
0.337	0.09	0.427
0.445	0.09	0.535

Zondag ve arkadaşlarının (2002) yaptıkları çalışmada PV/T sistemin günlük çıkışını belirlemek için bu ısı akışlarını hesaplayan dinamik ve kararlı durum 3D modeli, 2D modeli ve 1D modeli olmak üzere dört nümerik model geliştirilmiştir. Termal toplayıcı ile modülden elektrik çekildiğinde ve çekilmediğinde PV/T sistem için tahminlenen verim değerleri Tablo 2-1’de, bu modellere göre hesaplanan ısı verim değerleri ile 1D modeli ile hesaplanan termal toplayıcı için ısı, PV modül için elektriksel verim ile PV/T sistemde sırasıyla ısı ve elektriksel verim değerleri Tablo 2-5’te verilmiştir.

Tablo 2-5 Zondag ve arkadaşlarının (2002) yaptıkları modelleme çalışmalarından elde edilen verim değerleri

PV/T Sistem Modeli	$\eta_{th,0}$	Sistem	η_e (%)	$\eta_{th,0}$ (%)
1D	0.63	Termal toplayıcı	----	54
2D	0.62	PV modül	7.2	----
2D (örtüsüz)	0.61	PV/T sistem	6.7	33
3D	0.60			

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Giriş

Bu bölümde PV/T hibrid sistemi oluşturan elemanların özellikleri, neden seçtikleri ve çalışma şekilleri tanıtılacaktır. Elemanların özellikleri verimi artıracak şekilde seçilmiştir. Daha sonra PV/T hibrid sistemin modeli elde edilecektir.

3.2. PV/T Hibrid Sistem Elemanları

3.2.1. Güneş Modülleri

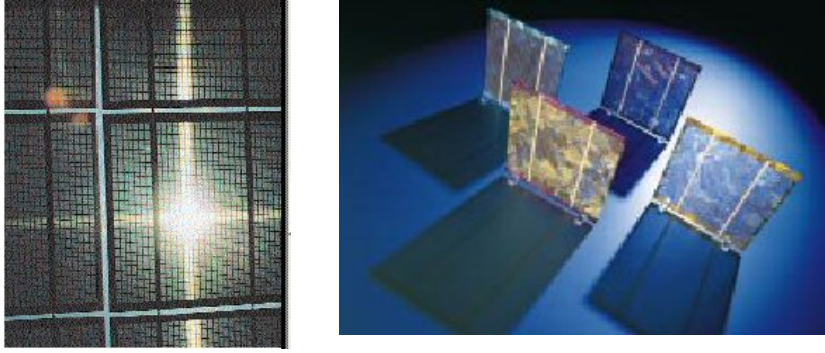
Güneş pilleri gelen güneş ışınımını doğru akım elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken aygıtlardır. Güneş hücreleri olarak adlandırılan bu en küçük birimler gerilim, akım veya hem gerilim hem de akımı artırmak için seri, paralel veya seri/paralel bağlanarak güneş modülleri adını alırlar. Güneş pilleri çeşitli teknolojiler ve malzemelerle üretilmektedirler. Silisyum en çok kullanılan yarıiletkenidir. Monokristal, polikristal ve amorf-Si şeklinde üretilmektedirler. Bunların dışında ince film teknolojisiyle yapılan üretimlerde en çok a-Si kullanılmakla beraber polikristal bakır indiyum diselenid (CIS) ve kadmiyum tellür (CdTe) de ticari olarak kendilerine geniş bir yer bulmaktadırlar. İki yarıiletken elementin bir birleşimi olan galyum arsenid (GaAs) ise, yüksek performanslı güneş pillerinin üretiminde kullanılmaktadır. Son yıllarda üzerinde en çok çalışılan bir başka güneş pili ise “dye-sensitized solar cell” (DSC) adı altında organik güneş pilleridir. Güneş ışığını yutucu yüzeye aktarabilen saydam yapıda olmaları, artan

sıcaklıkla performansın artması, gölgelenmeye duyarlılığının düşük olması, ışınımın geliş açısına duyarlılığının az olması ve ticari tiplerinin veriminin %10 civarında olması gibi üstünlüklerine rağmen kullanılan elektrolitin zamanla kuruyarak güneş pilini kullanılamaz hale getirmesi önemli bir sakıncasıdır (Skryabin ve arkadaşları.1997). Sıvı elektrolit yerine katı elektrolitler kullanılması üzerine yapılan çalışmalar devam etmektedir.

Güneş pilleri tek jonksiyonlu üretildiklerinde yutucu malzemenin enerji bandından (E_G) daha düşük enerji fotonları kullanılmamaktadır. Güneş pili yutucu yüzeyine gelen güneş ışınımının daha fazlasının yararlı enerjiye dönüştürülebilmesi için iki veya daha fazla farklı enerji bandına sahip hücreler üst üste katmanlardan oluşacak şekilde üretilmektedirler. Bunlara çok jonksiyonlu (multijunction), kaskad veya tandem hücreler denmektedir. Monolitik ya da mekanik olarak üretilirler. Monolitik yığın üretimde farklı enerji bandına sahip hücreleri oluşturacak şekilde gerekli malzemelerden katmanlar sırasıyla birbirinin üstüne büyütülmekte ve hücreler arası bağlantılar yapılmaktadır. Mekanik yığınlarda ise, hücreler ayrı ayrı üretilip saydam yapıştırıcı ile üst üste yapıştırılmaktadırlar.

Tek kristal çok jonksiyonlu hücrelerin verimi %30'ları aşmakta iken ince-film çok jonksiyonlu hücreler %15 civarında bir verime sahiptirler (Lodhi, 1995). Yüksek veriminden dolayı GaAs tercih edilen bir hücre bileşenidir. Tipik bir üçlü jonksiyonda farklı enerji bantlarına sahip üç adet a-Si katman bulunmaktadır. Bu katmanların hepsi hidrojenle katkılandırılmış a-Si (a-Si:H) olabileceği gibi amorf silisyum ile germanyum (a-SiGe:H) bileşiminden de oluşmaktadır. Amorf silisyumda eğilim tek jonksiyon yerine çok jonksiyonlu üretime doğru kaymıştır.

Günümüzde temiz enerji üretimine verilen önem kadar bina estetiğine de önem verilmektedir. Güneş modüllerinin bina çatılarında elektrik enerjisi üretiminin yanı sıra hem estetik görünmesi hem de işlevsel olması için yarı saydam güneş pilleri üretilmektedir (Şekil 3-1). Bu modüller çatı malzemesi olarak kullanılabilirdiği gibi güneş ışınımını %10 ile %30 arasında geçirme özelliğinden dolayı bina duvarlarında da kullanılmaktadır (Şekil 3-2).



Şekil 3-1 Çeşitli yarı saydam güneş pilleri (Sunways Powercell)



Şekil 3-2 Yarı saydam güneş pillerinin çatı malzemesi olarak kullanımı

Güneş pilleri tarafından soğurulan güneş ışınımının çoğu elektrik enerjisine dönüştürülmez, hücre sıcaklığını artırarak elektriksel verimi düşürür. Daha yüksek bir verim elde etmek için çalışma sırasında bu ısının hücrelerden uzaklaştırılması gerekir. Fotovoltaik dönüşüm verimi sıcaklığın doğrusal olarak azalan bir fonksiyonu olduğundan soğutulan güneş pillerinin güç çıkışı artacaktır. Bu amaçla güneş pillerine tümleşik kollektörlerin kullanılarak hücre sıcaklığını düşürecek sistemler üzerinde çalışmalar başlamıştır. Bu sistemlerde güneş pili bir düzlemsel toplayıcının üstüne yapıştırılarak birleşik güneş pili/termal toplayıcı (PV/T) hibrid sistemler oluşturulmaktadır. Bu sistemlerde termal toplayıcı güneş pilinin ısını taşıyıcı akışkana aktarabilmekte ve güneş ışınımı üzerine düşmemektedir. Güneş ışınımının bir kısmının termal toplayıcı üzerine düşmesi amacıyla yarı saydam güneş pillerinin kullanılması önerilmektedir. RWE Schott Solar firmasının ürettiği yarı saydam ince-film amorf silisyum güneş pili Şekil 3-3'te görülmektedir. Bu güneş modülünün elektriksel verisi Tablo 3-1'de verilmiştir.



Şekil 3-3 RWE Schott Solar firmasının yarı saydam ince-film a-Si tandem güneş modülünün görünüşü.

Tablo 3-1 Modülün Elektriksel Verisi

Nominal Güç	P_{MPP}	27Wp
Maksimum güç noktasındaki gerilim	U_{MPP}	36V
Maksimum güç noktasındaki akım	I_{MPP}	0.75A
Kısa devre akımı	I_{sc}	1.02A
Açık devre gerilimi	U_{oc}	49V

Yukarıdaki elektriksel veri modülün birkaç ay güneş ışığına maruz kaldıktan sonraki kararlı durumu için standart test koşullarında (STC - 1000W/m², AM 1.5, hücre sıcaklığı 25°C) elde edilmiştir. Başlangıçta güç çıkışı nominal gücü %18 oranında aşabilir. Verinin toleransı $\pm\%10$ 'dur. Güneş modülünün boyutlar ve ağırlığı Tablo 3-2'de karakteristik verisi Tablo 3-3'te verilmiştir. Modül 30 adet seri bağlı hücreden oluşmaktadır. Sıcaklık çalışma aralığı -40...+85°C, nominal çalışma sıcaklığı NOCT = 49°C'tır ve hücre sıcaklık katsayıları Tablo 3-4'teki gibidir.

Tablo 3-2 Boyutlar ve ağırlık

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

Tablo 3-3 Karakteristik veri

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 ² kesit alanı, 100cm uzunluk, MC® konnektör

Tablo 3-4 Hücre sıcaklık katsayıları

Nominal güç için	$T_K(P)$	- % 0.2/K
Açık devre gerilimi için	$T_K(U_{oc})$	- % 0.33/K
Kısa devre akımı için	$T_K(I_{sc})$	+ % 0.08/K
ASI THRU® güneş pili için güç çıkışının sıcaklığa bağımlılığı düşüktür.		

3.2.2. Termal Kollektörler

Yenilenebilir enerji teknolojisiyle üretilen güneş enerjili ısıtma sistemleri evlerin olduğu kadar okullar, işyerleri, kamu binaları ve havuzların da sıcak su ve mekân ısıtma gereksinimini karşılamaktadır. Termal kollektörler güneşe bakan çatılara veya gölge almayan yerlere yerleştirilerek birçok binanın ucuz ve temiz sıcak su ihtiyacını karşılayabilir. Pek çok uygulama için değişik sistemler bulunmaktadır. Düşük sıcaklık uygulamaları için örtüsüz kollektörler kullanıldığı gibi, çok miktarda yüksek sıcaklıktaki suya gereksinim duyulan hastaneler, büyük siteler gibi yerlerde de parabolik toplayıcı termal kollektörler kullanılabilir. Türkiye gibi sıcak iklimli bölgelerde doğal dolaşimli, pasif sistemler ucuz bir çözümdür. Bu sistemlerde maliyeti artıran pompa ve elektronik kontrol aygıtı gibi pahalı ek donanıma gereksinim duyulmamaktadır.

Çok sayıda farklı güneşli su ısıtma sistemleri bulunmakla beraber çalışma ilkesi hepsinde aynıdır. Gelen güneş ışınımı termal kollektördeki bir yutucu yüzeyi ısıtmakta, yutucu yüzeyle ısıl temastaki borular içinden geçen ısı iletimi için kullanılan bir akışkan ya da şebeke suyu da bu ısıyı absorbe eder. Örneğin antifrizli su gibi ayrı bir ısı transfer akışkanı kullanıldığında sistemde bir de ısı değiştirgeci bulunur ve onun aracılığı ile şebeke suyu

ısıtılır. Isıtılan su gereksinim duyulana kadar ayrı bir ön ısıtma tankında ya da doğrudan bir konvansiyonel su ısıtma tankında depolanır. Ek sıcaklığa gereksinim duyulursa, elektrikli veya fosil yakıtlarla çalışan konvansiyonel su ısıtıcılarla ısıtma yapılır. Bu şekilde yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş ile ısıtma yapılarak yaklaşık %80 oranında elektrik ve fosil yakıt kullanımı azaltılmaktadır (NREL¹, 1996).

Yararları

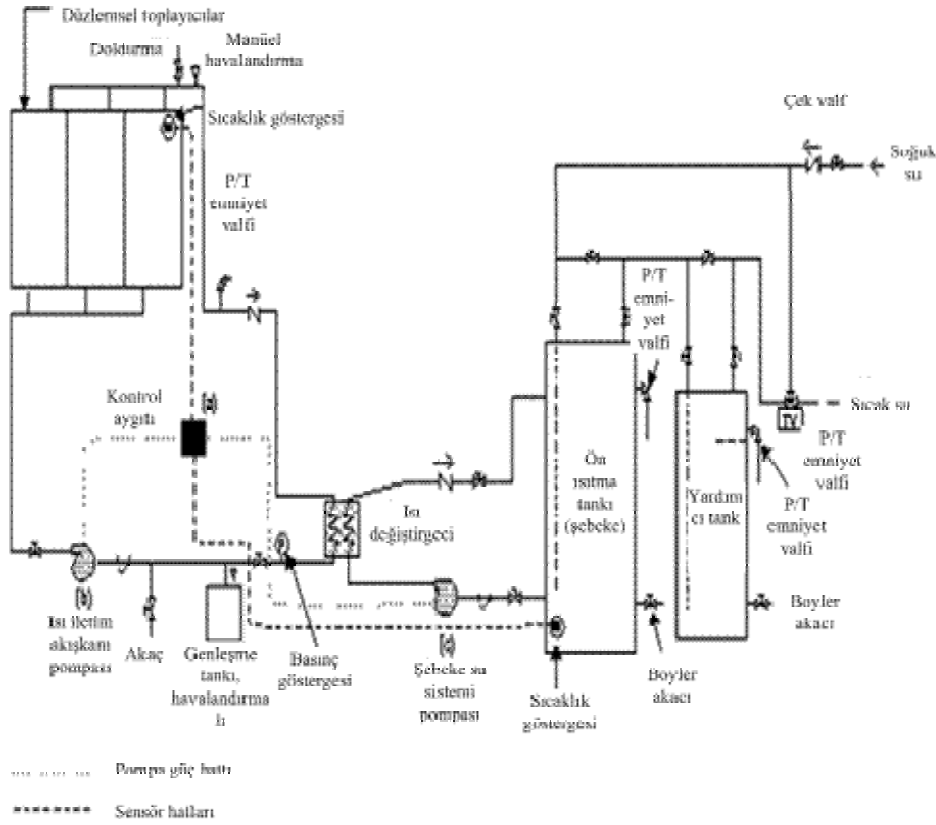
Yenilenebilir enerji kaynağını kullanan güneşli su ısıtma sistemleri konvansiyonel enerji kullanımını azaltmaktadır. Doğal gaz, propan veya fuel oil ile su ısıtma yalnızca %60 oranında verimlidir ve elektrikle su ısıtma %90 verimli olmasına rağmen fosil yakıtlardan elektrik üretimi %30 ile %40 oranında verimlidir. Dolayısıyla, su ısıtmada fosil yakıt kullanımının azaltılması yalnızca fosil yakıt rezervlerinin azalmasını engellemeyecek aynı zamanda da bu yakıtların kullanımından doğan hava kirliliği ve gaz emisyonundan kaynaklanan iklim değişimlerinin önüne geçilmesini de sağlayacaktır.

Sistem çeşitleri

Güneşli su ısıtma sistemleri aktif veya pasif, doğrudan veya dolaylı, basınçlı veya basınçsız olabilir. Büyük miktarlarda su ısıtma amacıyla en çok kullanılan antifrizli sistemler aktif ve dolaylı sistemlerdir. Aktif güneşli su ısıtma sistemleri ısı transfer akışkanını kollektör ve depo arasında bir

¹ National Renewable Energy Laboratory

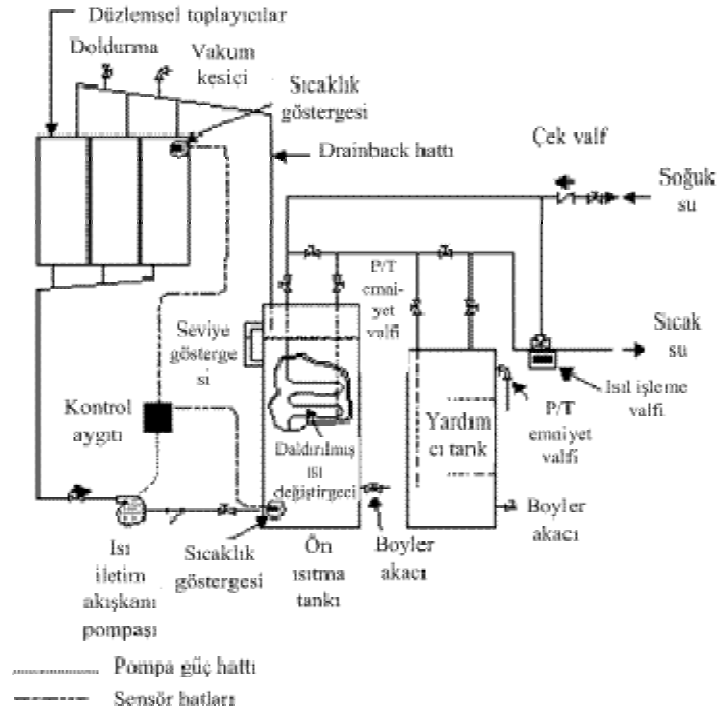
pompa aracılığıyla dolaştırır. Dolaylı aktif sistemlerde şebeke suyunu ısıtmak için bir ısı değiştirgeci kullanılır. Antifrizli sistemlerde toksik olmayan, genellikle propylene glycol, bir akışkan kollektörde dolaştırılır. Şekil 3-4'te böyle bir sistem görülmektedir.



Şekil 3-4 Aktif, dolaylı ve antifrizli sistem (Solar Water Heating.htm, NREL EL-May 1996)

Kışın soğuk geçen iklimlerde bile ısı transfer akışkanı olarak suyun kullanıldığını sıkça görürüz. Bunu nedeni suyun ısı transfer özelliklerinin ve kararlılığının çok iyi olması, korozif olmaması ve ucuz olması sayılabilir. Sistemin donmaktan korunması için kollektörden geçen suyun şebeke

suyunu ısıtamadığı ve donma tehlikesinin olduğu durumlarda pompanın durdurularak borulardaki suyun tamamen boşaltıldığı (*drain-back*) sistemler kullanılmaktadır. Şekil 3-5'te böyle bir sistem görülmektedir. Basınçlı olan çoğu dolaylı sistemin aksine, çoğu drain-back sistemler basınçsız ısı transfer akışkan döngüsü kullanırlar. Bu şekilde sistem gereksinimleri azaldığından maliyet de düşük olmaktadır.



Şekil 3-5 Aktif, dolaylı, iki tanklı Drain-Back Sistemleri (Solar Water Heating.htm, NREL EL-May 1996)

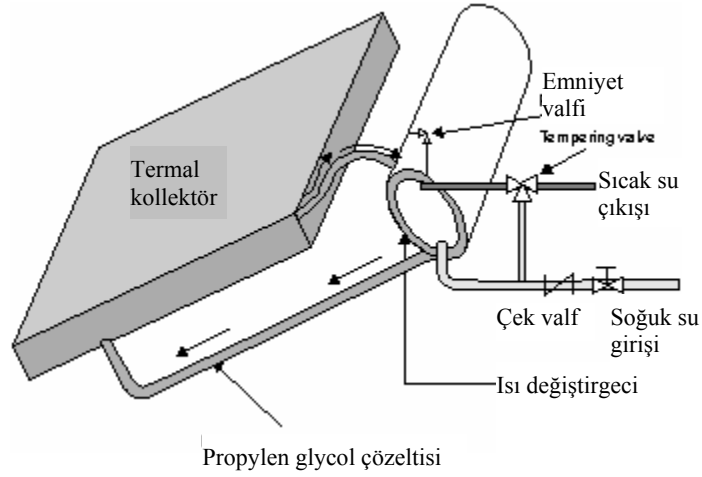
Doğrudan aktif sistemler, kullanılacak şebeke suyunu doğrudan kollektörden dolaştırırlar. Isı değiştirgecine gereksinim duyulmadığından verim %5-%10 arasında daha fazladır, ancak sistemin donmaya karşı korunması için bazı önlemler alınması gerekmektedir. Kontrol sistemleri

donma koşullarını algıladığında, drain-down sistemlerindeki vanalar kollektör döngüsündeki su ile servis edilen su bağlantısını keserek kollektördeki suyun bir savak ya da akaça akması sağlanır. Donma tehlikesine karşı alınan bir başka önlem ise ısıtılan suyun kollektörden yeniden dolaştırılmasıdır. Bu karşılaşılan donma sorunları yeni sistemlerde yapılan tasarım değişiklikleri ile önlenebilir. Doğrudan sistemlerdeki bir başka sorun ise kireçli sudur - ki kireç borularda birikebilir ve akışı kısıtlayarak hem verimi düşürebilir hem de donma tehlikesini artırır.

Ilıman iklimlerde küçük sistemler için pompa ya da elektronik kontrole gereksinim duymayan pasif sistemler iyi bir seçimdir. Basitliği ile ön plana çıkan bu sistemler İzmir gibi donma riskinin az olduğu iklimler için en çok kullanılan sistem çeşididir. Ancak suyun kollektörün dışında veya yakınında depolanmasından dolayı ısı kayıpları yüksektir. Özellikle soğuk iklimlerde bu ısı kaybı, neticede absorbe edilen güneş enerjisinin kullanılma yüzdesi açısından, sistemin verimini düşürmektedir.

Pasif sistemlerden bütünleşmiş kollektör sistemleri ısıtılan suyu kollektörün içinde saklar. Termosifon sistemlerinde ise kollektörün üzerinde bulunan ayrı bir depo bulunur. Doğrudan termosifon sistemlerde, ısınan su kollektörden tanka doğru yükselir ve tanktaki soğuk su kollektöre doğru akar. Dolaylı termosifon sistemlerde, ısınan antifriz kollektörden şebeke suyu deposunu çevreleyen bir dış tanka doğru yükselir ve bir ısı değiştirgeci gibi çalışır. Şekil 3-6'da böyle bir sistem görülmektedir. Hem ICS hem de termosifon sistemlerde kollektör veya tankın iyi yalıtılması donmayı engellediği gibi aynı zamanda gece ısı kayıplarını azaltır. Isı kaybının en fazla olabileceği bağlantılar, kollektörü tanka ve evin içindeki su hattına bağlayan borulardır. Boru boyutuna ve yalıtımına bağlı olarak, donma

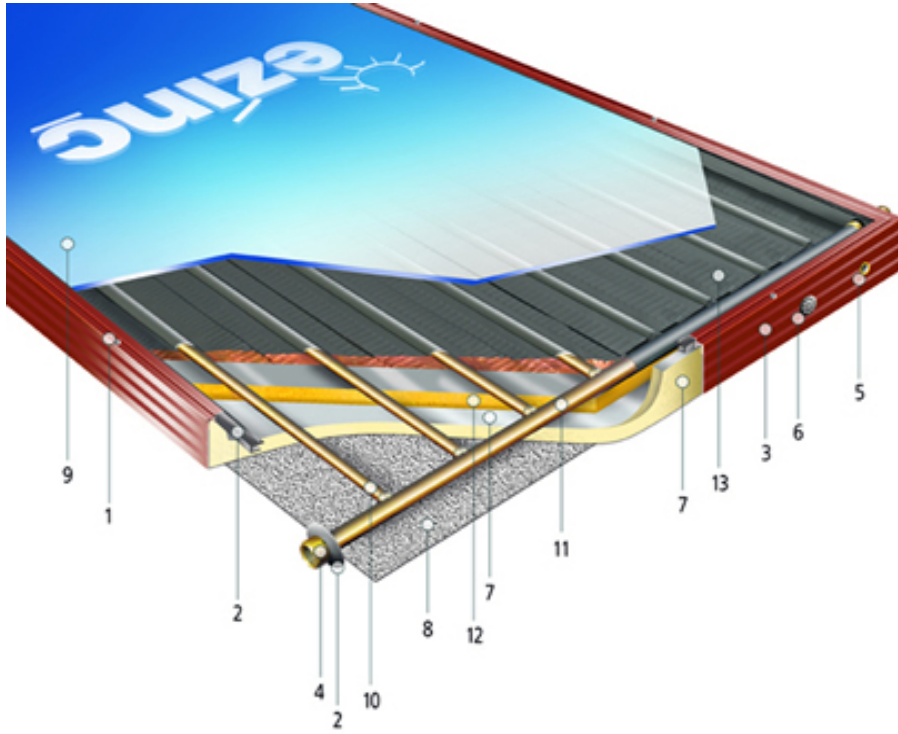
noktasından yüksek olan sıcaklıklara dayanabildiklerinden bu pasif sistemlerin kullanılabilecekleri iklimler dikkatle seçilmelidir.



Şekil 3-6 Pasif, Dolaylı Termosifon Sistem (Solar Water Heating.htm, NREL EL-May 1996)

Kollektör çeşitleri

Güneşli su ısıtma sistemlerindeki ana eleman olan kollektörler düşük, orta veya yüksek sıcaklıkta olabilir. Ticari olarak veya evlerdeki sıcak su gereksinimi için en çok kullanılan örtülü düzlemsel toplayıcılar ve genellikle su sıcaklığını 70°C'ye kadar yükselttikleri için orta-sıcaklıklı kollektörler olarak sınıflandırılırlar. Şekil 3-7'de görüldüğü gibi, düzlemsel toplayıcılar temel olarak yalıtımlı bir kasa, bir cam örtü, bir siyah yutucu yüzey ve ısı transfer akışkanının kollektörden geçişi bir boru sisteminden oluşmaktadır. Yutucu yüzeydeki özel kaplamalar güneş ışınımı absorpsiyonunu artırıp ısının geri ışınmasını en aza indirir. Böyle bir kollektöre ait parçalar aşağıda listelenmektedir:



Şekil 3-7 Eziñç Metal firmasına ait düzlemsel toplayıcı kesiti

1. Panel: Güneş ışınlarını emen, içinde kanallar bulunan iletkenliği yüksek malzemeden yapılan parçadır. Panel, güneş ışınımını ısıya çevirerek akışkanı (su, antifrizli su, yağ, vb.) ısıtır. Genel olarak paneller, iletkenliği en yüksek ve kullanılabilirliği en uygun olan bakır ve alüminyum metallere üretilmektedir.

2. Üst Örtü: Kollektörü dış etkilerden korumak, çevreye ışınım ve taşınım yollarıyla gerçekleşecek ısı kayıplarını azaltmak amacıyla saydam malzemeler üst örtü olarak kullanılmaktadır.

3. İzolasyon: Kollektörün içerisindeki sıvı akışkana iletilen ısı enerjisini korumaya yarar.

4. Kasa, Çıta: Kasa, kollektörü oluşturan panel, üst örtü ve yalıtım malzemeleri gibi kısımların dış hava etkilerinden korunması için kullanılan muhafaza ve birleştirme aksamıdır. Çıta, camı kasaya monte etmeye yarayan sızdırmazlık sağlayan parçadır.

5. Cam Fiteli: Tam su sızdırmazlığı sağlayıcı formda, dış ortam etkileri ve güneş ışınımıyla gelen zararlı ultraviyole (UV) ışınlara dayanıklı, uzun ömürlü bir kauçuktan imal edilirler.

6. Manifold Contası: Tam su sızdırmazlığı sağlayıcı, dış ortam etkileri ve ultraviyole (UV) ışınlara dayanıklı, uzun ömürlü bir kauçuktan imal edilirler.

7. Taban Sacı: Dış etkilere karşı kollektör içindeki malzemeyi koruyan alüminyum, galvanizli sac, vb. malzemedendir yapılır.

8. ¾" Çıkışlar: Kollektörleri birleştirmeye yarayan, tesisatla bağlantının yapıldığı yerlerdir.

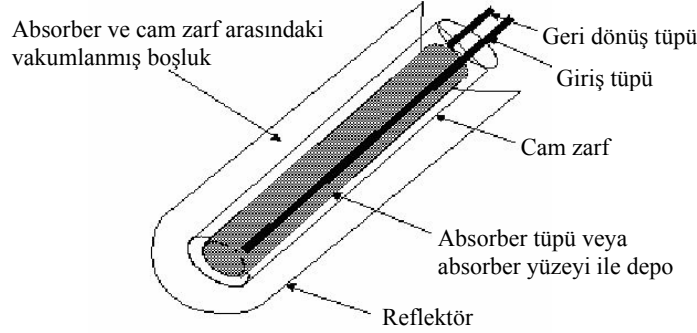
9. Akışkan Taşıyıcı Borular: İçerisindeki akışkan sıvının kolayca hareket etmesini sağlayan uygun form ve adette bulunan kanallardır.

10. Manifold Borusu: Taşıyıcı kanallardan gelen akışkanı toplayan ve dağıtan kanallardır (Eziñ Metal, 2004).

Su sıcaklığını 30-35°C'ye kadar yükselten düşük sıcaklıklı kollektörler örtüsüz bir yutucu yüzey ve akışkan kanallarından oluşan bir yapıya sahip olduğundan ve yalıtımsız ve ucuz malzemedendir yapıldığından daha ucuzdurlar, ancak ısı verimleri daha düşüktür. Daha çok düşük sıcaklığın yeterli olduğu yüzme havuzlarında kullanılırlar. Ilıman

iklimlerde, düşük-sıcaklıklı kollektörler bazen kışın havuzun ısıtıldığı, yazın su ısıtmasının yapıldığı hibrid sistemlerde kullanılırlar.

Fabrikalar, iş merkezleri, okullar, yurtlar, hastaneler, oteller, tatil köyleri, pansiyonlar, misafirhaneler, sosyal tesisler, büyük çaplı çamaşırhaneler, vb. büyük çaplı işletmelerin sıcak su gereksiniminin karşılanması, havuz suyu ısıtma, proses sıvılarının ön ısıtmasında yüksek-sıcaklıklı endüstriyel sistemler kullanılmaktadır. Bu uygulamaların bazılarında orta-sıcaklıklı kollektör sistemleri yeterli olabilmektedir, ancak su sıcaklığını 175-180°C'ye kadar yükselten daha yüksek sıcaklıklarda çalışan kollektörler daha uygun olmaktadır.



Şekil 3-8 Vakumlu cam boru yapım ayrıntıları (Solar Water Heating.htm, NREL EL-May 1996)

Orta-sıcaklıklı sistemlerde kullanılmasına rağmen, vakumlu-tüp kollektörler su/buhar sıcaklığını 175-180°C'ye kadar çıkarmak için tasarlanabilirler. Çok çeşitli konfigürasyonlara sahip olabilirler, ancak genellikle yüksek verimli yalıtım için absorber yüzeyi ve çalışma akışkanı tüplerinin her ikisi birden tüp şeklindeki bir vakumlu cam borunun içinde

bulunur (Şekil 3-8). Vakumlu-tüp kolektörler düşük seviyedeki difüz güneş ışınımı altındaki soğuk iklimler için en yüksek verimli kolektör tipidir. Havanın bulutlu olduğu, güneş ışığının az yansıdığı günlerde maksimum verim elde edilir. Gelen güneş ışınımı vakumlanmış olan tüplerin içerisinde absorbe edilerek, vakum ortamından dolayı ısıtılmış olan tüp içindeki selektif yüzey ile ısıtılan termal ısıtıcı ısıyı geri yansıtılmaz ve doğrudan tankın içerisindeki kullanım suyuna iletir (Şekil 3-9). Donma riski yoktur ve -55°C 'ye kadar sıcaklıklarda çalışabilir (Baymak, 2004). Çatıya veya yere monte edilebilirler, fakat dolu ve fırtına gibi doğal olaylarda zarar görebilirler.



Şekil 3-9 Vakumlu tüp kolektör (Baymak)

Kurulum

Termal kolektörler binanın çatısına veya bina yakınında yere monte edilebilirler. Yıl boyu kullanımlar için, kolektör için en verimli yerleşim bulunulan yerin enlemi kadar eğimli ve güneşe bakacak şekilde yerleşimdir. (Kışın enlem artı 15° ve yazın enlem eksi 15° ısı toplama kapasitesini artırır.) Kolektörler uygun eğimle yerleştirilebilmek için

montaj ayakları üzerine oturtulurlar. Yerleşim optimum değere ne kadar yakın olursa, varolan enerjiden verilen ödün o kadar azalır. Gerçek güney yönü yerleştirmede, kollektörleri enlemden 25° farklı açıyla eğimlendirmek sadece %10'luk kayba neden olacaktır.

Uygulama Kriterleri

Bir güneşli su ısıtma sistemini kurmak için ilk adım gereksinim duyulan sıcak su miktarının belirlenmesidir. Çeşitli gereksinimler için hangi sıcaklıkta suya gereksinim duyulduğu ve bu kullanımın günün hangi saatlerinde olduğunun belirlenmesi gerekir. İkinci adım, ekonomik yönünün de düşünülerek kullanılan suyun ısıtılması için ne kadar para ödendiğinin belirlenmesi ve güneşli su ısıtma sisteminin maliyeti ve kullanım giderleri ile karşılaştırılarak mali açıdan verimli olup olmadığının da belirlenmesi gerekir.

Genel kural olarak yenilenebilir enerji sistemi kurulumu kendini 10-15 sene içinde geri öder. Bir sistemin ömrünün en fazla 30 yıl olduğu düşünülürse, bu 20 yıllık bedava enerji kullanımı demektir.

Sistem Seçimi ve Kazanç

Genel bir kural olarak, optimum güneş enerjili su ısıtma sistemi tipi seçimi sistemin kullanılacağı su sıcaklığındaki artışa göre yapılır. Örtüsüz ve yalıtımsız olan düşük sıcaklıklı sistemler güneşten gelen ısının yüksek bir oranını absorbe eder fakat aynı zamanda oldukça büyük miktarlarda enerji kaybeder. Dolayısıyla daha çok su sıcaklığında makul artışların gerektiği yüzme havuzu gibi uygulamalar için çok uygundur. Örtü ve yalıtımın eklenmesiyle ısı absorpsiyonu azalır fakat ısıyı tutma oranı artar, dolayısıyla

suyun sıcaklığında daha yüksek artışların gerektiği uygulamalar için orta-sıcaklıklı sistemlerin ilave maliyeti daha uygundur. Yüksek yalıtımlı ve güneş ışığını toplayan parabolik yansıtıcı vakumlu tüpler gibi yüksek sıcaklıklı sistemler çok yüksek miktarlarda sıcak su elde etmek için veya mutfaklar, çamaşırhaneler ya da endüstriyel uygulamalar için kullanıldıklarında en yüksek verimi sağlarlar.

Teknolojik Performans

Güneş enerjili su ısıtma sistemi teknolojisi çok gelişmiştir ve iklime ve yüke doğru olarak uyumlandırıldıklarında, bugünün güneş enerjili su ısıtma sistemlerinin çalışmaları doğrulanmış ve güvenilirlerdir. Güneş enerjisi ile su ısıtma yüksek verimlilikle çalışan yenilenebilir bir enerji teknolojisidir. Konutlarda, otellerde ve ticari binalarda su ısıtma için harcanan enerji elektrik ve fosil yakıt tüketimine neden olurken, kullanımının maliyet açısından verimli olduğu yerlerde, güneş enerjili su ısıtma sistemlerinin kullanılması hem yakıt tüketimini azaltacak hem de CO₂ emisyonunu azaltacaktır. Mali olarak verimli sistem tasarımı yazın sıcak su tüketiminin çoğunu ve kışın bir kısmını karşılar.

Sistem Bakımı

Güneş enerjili su ısıtma sistemleri uzun ömürlüdür ve çok az özen gerektirir. Ancak, herhangi bir mekanik sistemde olduğu gibi, sistemin düzgün çalışmasını sağlamak için temel bir bakım gerekir. Tüm güneş enerjili su ısıtma sistemleri yılda iki kere denetlenmelidir. Aktif sistemlerdeki sensörler ve denetleyicilerin doğru çalışıp çalışmadıkları denetlenmelidir. Sorunların başlıcası sert sudan kaynaklanan kireç

kalıntılarıdır. Diğer ana bakım gerektiren unsurlar pompaların bozulması ve tanklardaki sızıntılardan kaynaklanmaktadır. Kollektörler için 10 yıllık garanti bir endüstri standardı haline gelmiştir.

Birleşik kollektör ve termosifon sistemlerinin bakım gereksinimi azdır. Suyun kireçli olmaması durumunda, sistemler flushing'e gereksinim duymazlar ve 20 ile 30 yıl dayanırlar. Direkt termosifon sistemleri kireçli sularla çalışan servisler için önerilmemektedir. Dolaylı termosifon sistemlerindeki antifriz her 5-10 yılda bir değiştirilmelidir.

3.3. Güneş Pili Modeli

Güneş pilinin elektriksel karakteristiği kollektör akışkan giriş sıcaklığından etkilenmektedir. Ayrıca ısı kayıpları azaltmak için kullanılması düşünülen cam örtü de yansımaları neden olacağı için optik kayıplara yol açacaktır. Ancak güneş pili için bu optik kayıplardan kaynaklanan verim düşüşü, kristal sıcaklığının düşmesinden kaynaklanan verim artışına oranla daha azdır.

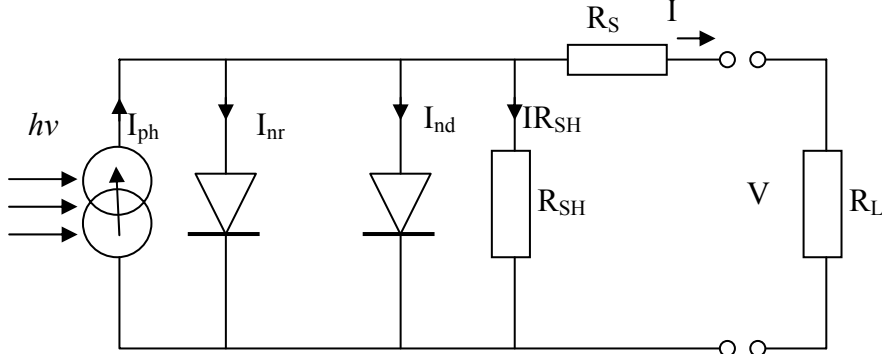
Kollektörde ise, güneş modülünün kollektörün üstünde olmasından dolayı artan özgül ısı ısı karakteristیکlerde değişmeye neden olur.

Güneş modülü ve termal kollektörün bir arada kullanılması her ikisinin de karakteristiğini değiştireceğinden bütün bu incelemelerin yapılmasından önce sistemin matematik modelinin çıkarılarak incelenmesi ve daha sonra ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılması ve sistemden en iyi performansın alınabilmesi için de optimize edilmesi gerekir.

Güneş pilinin ısı sistemini bir parçası olarak da modellenmesi gerektiğinden dalga boyuna bağımlı malzeme özellikleri olan yutma $\alpha(\lambda)$, yayma $\varepsilon(\lambda)$, yansıtma $\rho(\lambda)$ ve geçirme $\tau(\lambda)$ değerleri üretici firmadan istenmiştir. Yarıiletken 3mm'lik cam üzerine uygulanmıştır. Cam ve yarıiletkenler kendi özelliklerini taşımakla beraber yutma oranı ikisinin birleşimi olarak düşünölmelidir. Camın yansıtma oranı %4 civarındadır. Camın yansıtma oranı da dâhil olmak üzere, güneş pili görünür ışığın yaklaşık %90'ını ve toplam güneş spektrumunun %60'ını absorbe eder. Geri kalan %40'ın çoğu yansıtılır. Güneş pilinin arka yüzünün yayma oranı yaklaşık %2'dir. Bu değerler opak güneş pili içindir ve yarı saydam güneş pilinin %10 oranında açık cam kısmı bulunmaktadır.

Eldeki veriler kullanılarak a-Si ince film güneş pili matematik modellenmesi üzerinde çalışılmıştır. Geliştirilen ilk iki modelde firmanın verdiği I-V karakteristik eğrisinden farklı eğriler elde edilmiştir. Bunun nedenleri arasında kullanılan modellerin tek kristal güneş pillerine göre geliştirilmiş olması, ancak a-Si güneş pillerinin tek kristal güneş pillerine oranla daha yüksek seri direnci olması, eğri düzeltme katsayısının yüksek olması ancak tam uygun değerinin bulunamamış olması, enerji boşluğunun daha yüksek olması ($E_g \approx 1.75\text{eV}$) ancak tam değerinin bilinmemesi, üretici firmanın tandem hücrelerden oluştuğunu belirttiği modölin yapısı hakkında ayrıntılı bilgi vermemesinden dolayı varsayımlarda yapılmış olası hataların bulunması, bu güneş pilinde rekombinasyon akımının yüksek olması ancak modelde hesaba katılmamış olması düşünölmüştür. Rekombinasyon akımı doğrudan güneş pilinin dolgu faktörünü (FF) etkilemektedir. Voc üzerinde de belirgin bir etkisi vardır (Zambrano ve arkadaşları, 2004). Dolayısıyla rekombinasyon akımının da dikkate alındığı Stutenbaeumer ve Mesfin'in

(1999) incelediği güneş pilinin karanlık akımının iki diyot ile gösterildiği bir model üzerinde çalışılmıştır (Şekil 3-10).



Şekil 3-10 a-Si güneş pili iki diyotlu eşdeğer modeli. I_{ph} ışık fotonlarının ürettiği akım, I_{nr} rekombinasyon akımı, I_{nd} difüzyon akımı, R_{SH} şönt direnç, IR_{SH} şönt dirençten geçen akım ve R_s seri dirençtir. I ise bir yükün çektiği akım ve V üzerindeki gerilim düşümüdür.

Bu modelde güneş pilinin karanlık akımı, difüzyon akımı ve rekombinasyon akımı cinsinden Eş. (3-1)'deki gibi ifade edilir.

$$I_0 = I_{0d} [\exp(V/V_{td0}) - 1] + I_{0r} [\exp(V/V_{tr0}) - 1] \quad (3-1)$$

Burada $V_{td0} = n_d k T_{c0} / q$ ve $V_{tr0} = n_r k T_{c0} / q$ 'dır. n_d ve n_r eğri düzeltme katsayıları, k Stephan-Boltzmann sabiti ve q elektron yüküdür.

Rekombinasyon akımı düşük akım değerlerinde baskın olurken difüzyon akımı yüksek akımlarda baskındır. Özellikle amorf silisyumun yapısındaki bozukluklardan dolayı eğri düzeltme katsayısı n_r ideal değerden belirgin bir şekilde farklılık göstermektedir (Stutenbaeumer ve Mesfin, 1999).

Şekil 3-10'da gösterilen güneş pili eşdeğer elektronik devresinde güneş pilinin ürettiği foto-akım I_{PH} bir akım üretici ile gösterilmiştir.

Karanlık rekombinasyon akım mekanizması birinci diyot ve difüzyon akım mekanizması ise ikinci diyot ile modellenmiştir. Eşdeğer devrede bulunan R_{SH} direnci güneş pilindeki yüksek-iletken yolları veya örneğin eklemdeki kristaldeki bozulmaları veya eklemdeki ince sivri uçlu metalleşmeyi ifade etmektedir. R_S direnci yarıiletkenin üst yüzeyindeki ve yarıiletken arayüzü-metal kontağındaki seri direnci belirtmektedir.

Bu dirençler de (R_S ve R_{SH}) dikkate alındığında Eş.(3-1) aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

$$I_0 = I_{0d} [\exp((V + IR_S)/V_{td0}) - 1] + I_{0r} [\exp((V + IR_S)/V_{tr0}) - 1] + (V + IR_S)/R_{SH} \quad (3-2)$$

Düşük R_S değerleri için IR_S çarpımı bire oranla küçük olacağı için düşük akımlarda aşağıdaki gibi yaklaşım yapılabilir:

$$I_0 = I_{0d} [\exp(V/V_{td0}) - 1] + I_{0r} [\exp(V/V_{tr0}) - 1] + V/R_{SH} \quad (3-3)$$

R_{SH} idealde sonsuz, pratikte ise çok yüksek değerde olduğundan çekeceği akım ihmal edilebilir düzeydedir. Bu modeldeki hesaplamaları daha sadeleştirmek için $R_{SH} = \infty$ kabul edilmiştir. Dolayısıyla modelde Eş.(3-1)'deki karanlık akımı kullanılmıştır. Devreden çekilecek net akım ise foto-akım I_{PH} ile karanlık akımı arasındaki farktır.

$$I_{PV} = I_{PH} - I_0 = I_{PH} - \{I_{0d} [\exp(V/V_{td0}) - 1] + I_{0r} [\exp(V/V_{tr0}) - 1]\} \quad (3-4)$$

Foto-akım ışınım şiddetine ve sıcaklığa bağlıdır.

$$I_{PH} = (G_a/G_{a0}) [I_{sc0} + uI_{sc} (T_c - T_{cref})] \quad (3-5)$$

G_a ışınım şiddeti (W/m^2), G_{a0} standart ışınım şiddeti ($1000W/m^2$), T_c hücre sıcaklığı ve T_{cref} güneş pili nominal çalışma sıcaklığı (NOCT)'dir.

Ek 1'de MATLAB ortamında yazılmış olan güneş pili matematik modelinde referans modül parametrelerinden hücre parametreleri elde edilmiş, nominal çalışma koşullarında hücre parametreleri hesaplanmış ve bunlar ışınım şiddeti ve sıcaklığa bağımlı parametreler olarak incelenmiştir. Güneş pilinin karanlık akımı bulunup daha sonra foto-akımından çıkarılarak akım değeri elde edilmiştir. Bu hesaplamalarda güneş pilinin gücü, dolgu faktörü (FF), seri direnci (R_s) gibi değerler de elde edilmiştir. Gerilim değerlerini sıfırdan açık devre gerilimine kadar artırarak hücre için I-V eğrileri farklı ışınımlar ve sıcaklıklar için elde edilmiştir (Şekil 3-11). Bu hesaplamalarda aşağıdaki veriler ve eşitlikler kullanılmıştır (Hansen ve arkadaşları, 2000).

Ortam sıcaklığı	$T_a=20+273 K;$
-----------------	-----------------

Güneş pili nominal çalışma sıcaklığı	$T_{Cref}=49+273K;$
--------------------------------------	---------------------

Işınım şiddeti	$G_a=750W/m^2;$
----------------	-----------------

Çalışma koşullarında hücre parametreleri:

$$c_1=I_{sc,0}/G_{a0}; \quad (3-6)$$

$$I_{sc}=c_1*G_a; \quad (3-7)$$

$$c_2=(T_{cref} -T_a)/G_{a0}; \quad (3-8)$$

$$T_C=T_a+c_2*G_a; \quad (3-9)$$

T_{cref} bilinmiyorsa,

$$T_C = T_a + 0.03 \cdot G_a \quad (3-10)$$

Hücre açık devre geriliminin sıcaklığa bağımlı ifadesi,

$$V_{oc}^C = V_{oc,0}^C - uV_{oc}(T_C - T_{C,0}) \quad (3-11)$$

Difüzyon akımının sıcaklığa bağımlı ifadesi (Duffie ve Beckman, 1991),

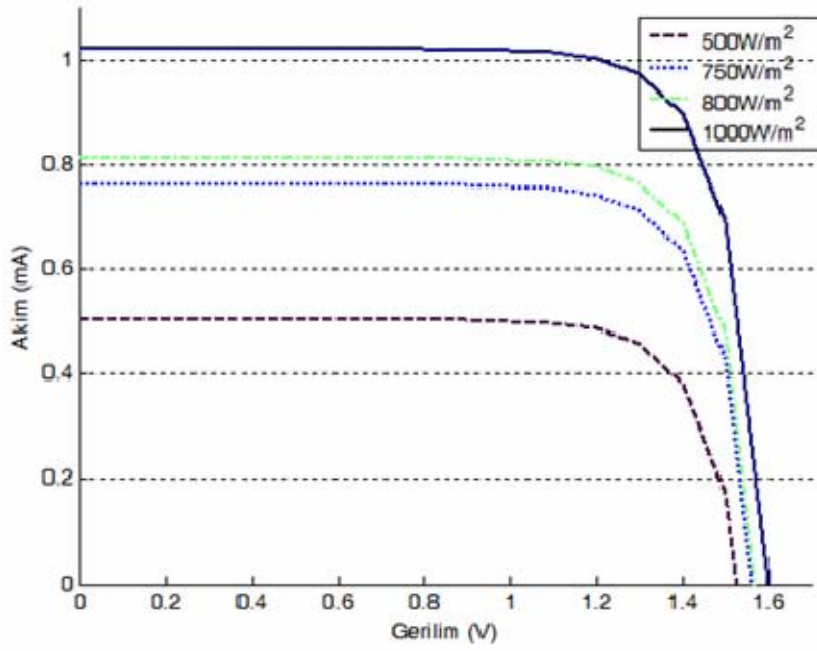
$$I_{0d} = I_{0,ref} \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{E_g Nq}{n_d k} \left(1 - \frac{T_{c,ref}}{T_c} \right) \right] \quad (3-12)$$

Program çalıştırıldığında modelden aşağıdaki veriler elde edilmiştir.

$$\text{eta0} = 4.5000$$

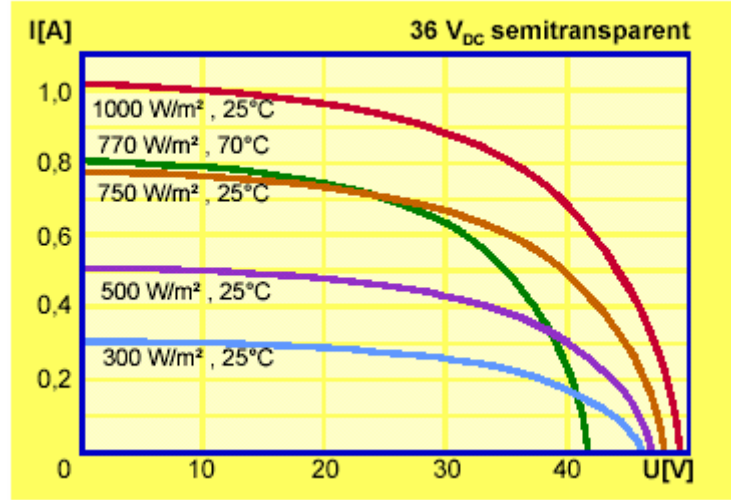
$$\text{FF} = 0.9850$$

$$R_s = 21.6924$$



Şekil 3-11 a-Si güneş pili modelinden elde edilen hücre I-V eğrisi.

Yukarıdaki eğride akım hücre gerilimi için çizdirilmiştir. Bu modülde 30 adet seri hücre olduğundan modül gerilimi de bunun 30 katı olacaktır. Düşük akımlarda seri direncin ihmal edilmesinden dolayı eğri ideale daha yakın elde edilmiştir. Seri direncin hesaplamaya katılmasıyla eğri üretici firma tarafından Şekil 3-12’de verilene yaklaşacaktır.



Şekil 3-12 a-Si güneş pili modülünün I-V eğrisi (Üretici firma RWE Schott Solar'ın ASITHRU-30-SG için yayınladığı karakteristik eğri).

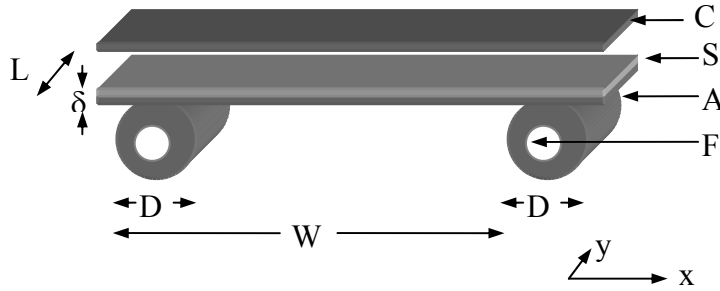
Bu model akım ve gerilimin, dolayısıyla verimin sıcaklığa bağımlılığını göstermektedir. Hibrid PV/T sistemlerde amaç güneş pilinin sıcaklığını azaltarak verimini artırmak olduğundan bu model ile beklenen değerler hesaplanabilir.

3.4. Hibrid Sistem Modeli

Binalarda sıcak suyun yanı sıra elektriği de güneşten üretmenin yaygınlaşması çevre kirliliğini önemli ölçüde azaltacaktır. İlk yatırım maliyetinin yüksek olmasına rağmen ülke ekonomisine ve çevreye katkıları uzun vadede olumlu olacaktır. Bu iki dönüştürücünün birleşik kullanılması maliyeti düşürebilir, aynı zamanda kullanıcıları ve üreticileri ikna etmeyi kolaylaştırır. Birleşik dönüştürücüler binaların çatılarına daha kolay ve az yer kaplayacak şekilde yerleştirilebilir. Özellikle güneşin bulunduğu saatlerde aktif olarak kullanılan okullar ve bazı işyerlerinde depolama

elemanı boyutu küçüldüğü için sistem ilk kurulum maliyetleri düşecektir. Dolayısıyla böyle bir birleşik sistemin modellenerek bu modelin denenmesi ve elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması gerekir. Önce bu konuda yapılan çalışmalarındaki modeller incelenmiş ve kurulan sisteme uyarlanmıştır.

Bergene ve Lovvik tarafından yapılan çalışmada sistem bir örtü “C”, bir güneş pili “S”, bir yutucu yüzey “A”, bir akışkan “F” ve ortam “a”dan oluşmaktadır. Yutucu yüzey, altında bir akışkan ile dolu borular olan bir yapıya sahiptir (Şekil 3-13). Dalga boyuna bağımlı malzeme özellikleri olan yutma $\alpha(\lambda)$, yayma $\varepsilon(\lambda)$, yansıtma $\rho(\lambda)$ ve geçirme $\tau(\lambda)$ ile tanımlanmaktadır. Bunlar genellikle $\rho(\lambda)+\alpha(\lambda)+\tau(\lambda)=1$ ve $\alpha(\lambda)=\varepsilon(\lambda)$ (Kirchoff yasası)na uyarlar. Işınım, iletim ve taşınım nedeniyle bileşenler arasında enerji alışverişi olasılığı vardır. İletim ve taşınım terimleri sıcaklık farkında doğrusal alınmış ve M ve N bileşenleri arasındaki genelleştirilmiş bir iletkenlik terimi şeklinde tanımlanmıştır (Bergene ve Lovvik, 1995).



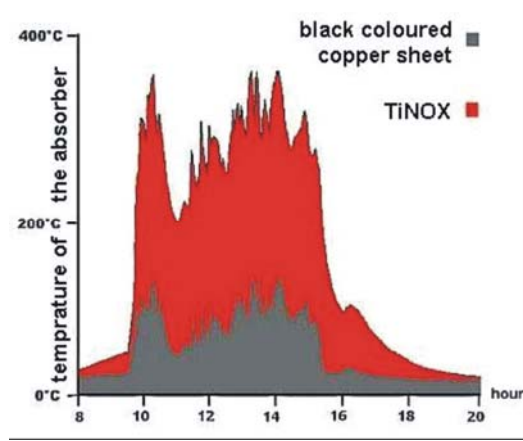
Şekil 3-13 Hibrid sistemin modelinde varsayılan geometrik yapılandırma. C örtü, S güneş pili, A yutucu yüzey, F akışkan, L tüm sistemin uzunluğu, δ yutucu yüzey (kanatçık) kalınlığı, D borunun çapı ve W bir birimin genişliğidir.

Bu yapıdan farklı olarak kurulan sistemde güneş pilinin verimini azaltmasından dolayı cam örtü kullanılmamıştır. Satın alınan ince-film a-Si PV modül iki cam arasında bulunduğundan dolayı düzlemsel plakalı

kollektörün cam örtüsü yerine PV modül kullanılmıştır. Dolayısıyla Bergene ve Lovvik'in modelinde cam örtüden taşınım ve ışınlama ısı transferi bu modelde bulunmamaktadır.

Düzlemsel kollektör yutucu yüzeyi düz ve plaka ile iyi ısı temas halinde silindirik borulardan oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Özellikle kış aylarında ısı verimi %16 ve yıllık ortalama enerji çıkışını %10 oranında artırdığı için yutucu yüzeye titanium dioksit kaplama yaptırılmıştır. Yeni yüzyılda üretilen güneş kollektörleri seçici yüzey kaplamalı yutucu yüzeyleri kullanmaktadır. Bunlar, güneş ışığını, siyah boyalı olanlardan daha iyi ısıya dönüştürürler. TiNOX® selektif kaplama özellikle verimlidir: infrared spektrumdaki infrared ışınlama azaltırlar. Yutucu yüzey güneş ışığından daha fazla ısı alır ve yüksek verimlidir. TiNOX® yutucu yüzey gelen güneş enerjisinin %95'ini soğurur ve ısı ışınlama yalnızca %5'ini yitirir: Soğurma düzeyi > %95. Bu kadar yüksek bir düzey kısa dalga boylarında mükemmel absorpsiyon sağlar. Yama düzeyi < %5. Bu düşük emisyon düzeyi infrared aralıkta yansımaya ile olan ısı kayıpları engeller (TiNOX® veri yaprağı ve www.tinox.com) .

Şekil 3-14'teki grafik bir selektif TiNOX® titanium yutucu yüzey ile bakır yüzeyi siyah boyalı bir "yutucu yüzey"i aynı iklim koşullarında karşılaştırmaktadır. Sonuç olarak, siyah boya titanium yutucu yüzeyin ulaştığı sıcaklığın yarısına bile ulaşamamaktadır. Selektif TiNOX® titanium yutucu yüzeylerin bu büyük verim avantajı açıkça görülmektedir.



Şekil 3-14 31/03/1995'te az bulutlu bir günde Linde AG tarafından alınan ölçümler.

Güneş pili yüzey alanı ile aynı olacak şekilde TiO_2 kaplamalı $60 \times 100 \text{ cm}^2$ boyutlarında, 0.20mm et kalınlığında özel olarak imal edilen bu yutucu yüzey kullanılarak kollektör üretimi yapılmış ve Güneş Enerjisi Enstitüsü binasının çatısına monte edilmiştir. 12mm iç çapına sahip 6 adet boru 10'ar santimetre aralıklarla özel dikiş olarak adlandırılan ultrasonik titreşim yöntemiyle yutucu yüzeye birleştirilmiştir. Bu kollektörün yutucu yüzeyinin yapım ayrıntıları Şekil 3-15'te görülmektedir.



Şekil 3-15 Titanium dioksit kaplamalı yutucu yüzey yapım ayrıntıları.

Sistemi güneş pili ve düzlemsel güneşli ısı kollektörü diye ayrı ayrı incelemek yerine birbirini etkileyen bir sistem olarak düşünmek yerinde olacaktır. PV/T sistemler üzerine yapılan deneysel ve modelleme çalışmaları incelenmiş ve Bergene ve Lovvik (1995) tarafından yapılan modelleme çalışmasına daha çok atıfta bulunulduğu görülmüştür.

Yazarlar bu modelin geçerliliğini kullanılan parametrelerin gerçekçiliğine dayandırmaktadır ve modellerinin ilgili deneylerle karşılaştırılabilir verimleri tahminlediği sonucuna varmışlardır. Ancak bu modelin eksikliklerinden biri rüzgârın hibrid sisteme olan etkisinin incelenmemiş olmasıdır. Bu modelleme için rüzgar hızı nominal koşullar için $v_{wind} = 1\text{m/s}$ olarak alınmıştır. Ancak cam örtü ya da kurulan sistemde

PV modülden rüzgârdan kaynaklanan taşınım ile olan ısı kayıplarının da dikkate alınması gerekmektedir. Cam örtü (yada PV modül) için olan enerji dengesi eşitliğinde rüzgarın etkisi için taşınım ısı transfer katsayısı, $h_{rüzgar}$ de dahil edilmelidir (Jie Ji ve arkadaşları, 2003). McAdams (1954) rüzgar için empirik ısı transfer katsayısını $h_{rüzgar} = 5.7 + 3.8v_{rüzgar}$ olarak tanımlamıştır. Jie Ji ve arkadaşları (2003) bu eşitliği kullanmışlardır. Literatürde bu eşitliğin 0.5m^2 'lik bir plaka için verildiği ifade edilmekte ve doğal taşınım ve ışıma etkilerinin de dâhil edilmiş olabileceği yorumu yapılmaktadır (Duffie ve Beckman, 1991). Watmuff ve arkadaşları (1977) bu eşitliğin $h_{rüzgar} = 2.8 + 3.0v_{rüzgar}$ şeklinde olması gerektiğini öne sürmüşlerdir (Duffie ve Beckman, 1991), ancak bu eşitlik de 0.5m uzunluğunda bir düzlemsel plaka içindir. Bu eşitliğin diğer plaka uzunluklarında geçerli olabileceğini düşünmek mantıklı değildir (Duffie ve Beckman, 1991). Bir PV modülde taşınım, serbest ve zorlanmış etkilerin birleşiminden oluşabilir. Soğuk günlerde PV modülün arka yüzeyi serbest taşınımdan dolayı, ön yüzü ise zorlanmış taşınımın etkisiyle soğur (Jones ve Underwood, 2000). PV/T sistemlerde PV modülün arka yüzeyi kolektör yutucu yüzeyi ile temasta olup iletim ile ısı transferi olmaktadır. Dolayısıyla bu sistemlerde yalnızca rüzgârlı havalarda zorlanmış taşınımın etkisinin incelenmesi yerinde olur. Bu tez çalışmasında ise, PV modül cam örtü yerine kullanıldığı için arka yüzeyde serbest taşınımdan dolayı soğuma olmayacaktır. Zorlanmış soğutma için bazı yazarlar $h_{rüzgar}$ ($h_{c,forced}$) katsayısının rüzgar hızının doğrusal fonksiyonu olarak yaklaşım yapılabileceğini öngörmektedir (Schott,1985). Literatürde 1m/s 'lik rüzgâr hızı için bu değer $1.2\text{W/m}^2\text{K}$ (ASHRAE, 1989), $5.8\text{W/m}^2\text{K}$ (Anis ve arkadaşları, 1983), $9.1\text{W/m}^2\text{K}$ (Schott,1985) veya $9.6\text{W/m}^2\text{K}$ (Pratt, 1981) olarak verilmiştir (Jones ve Underwood, 2000). Jones ve Underwood (2000) bu değeri buldukları

şehrin ortalama rüzgâr hızları (~2-3m/s), örneğin 2.5m/s, için $2\text{W/m}^2\text{K}$ ve ortalamanın üstündeki rüzgâr hızları, örneğin 6.7m/s, için $4\text{W/m}^2\text{K}$ olarak hesaplamışlardır.

McAdams, serbest ve zorlanmış taşınım aynı anda gerçekleştiğinde her iki değer de hesaplanıp hesaplamalarda büyük olanın kullanılmasını önermektedir. Güneş kolektörlerinde durgun hava koşullarında yaklaşık $5\text{W/m}^2\text{C}$ 'lik bir minimum değer gerçekleşmektedir. Mitchell'in sonuçlarına göre binaların üstünde zorlanmış taşınım koşulları aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir (Duffie ve Beckman, 1991, p.175):

$$h_{rüzgar} = \frac{8.6v^{0.6}}{L^{0.4}} \quad (3-13)$$

Isı transfer katsayısı yeniden yazılırsa,

$$h_{rüzgar} = \max \left[5, \frac{8.6v^{0.6}}{L^{0.4}} \right] \quad (3-14)$$

Farklı rüzgâr hızlarında yapılan hesaplamalar sonucu, Mc Adams ve Mitchell'in ısı transfer katsayısı bağıntıları birbirine oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Modelde McAdams eşitliği kullanılmıştır.

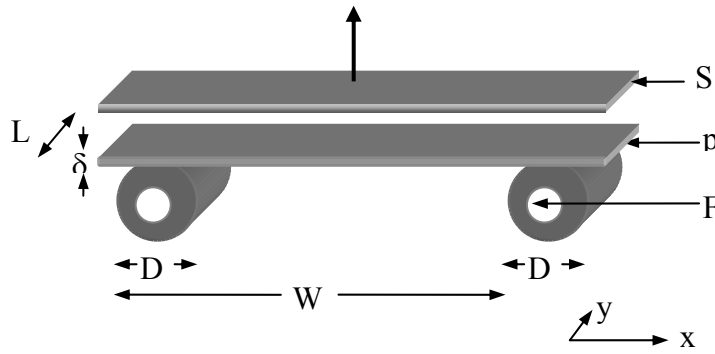
Bergene ve Lovvik (1995) tarafından yapılan bu modelleme çalışmasında ışıınım da sabit tutulmuş ve gün içinde ışıınımdaki değişmelerin sisteme olan etkileri incelenmemiştir. Zondag ve arkadaşları (2002) tarafından yapılan çalışmada ışıınımdaki bu değişimlerin etkisi dinamik 3D modeliyle incelenmiş ve bu modelle yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen enerji çıkışı ile kararlı durum 3D modeliyle hesaplanan arasında

%0.2'lik bir fark olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla yazarlar gün içinde dinamik etkilerin büyük miktarda etkisinin azaldığı sonucuna varmışlardır. Jie Ji ve arkadaşları (2003) ışınımın etkisinin ihmal edilemeyeceğini öne sürerek buldukları şehrin yataya gelen saatlik güneş ışınımı değerlerinden eğik düzleme gelen ışınımı hesaplayıp bunun PV/T sisteme olan etkisini yıllık olarak incelemişlerdir.

PV/T sistemin performansının rüzgâr hızı ile değişiminin yanı sıra güneş ışınımı ile değişiminin de modelde incelenmesi daha doğru sonuçlar verecektir. Güneş Enerjisi Enstitüsü binasının çatısında ölçülen güneş ışınımı, sıcaklık ve rüzgâr hızı değerleri kullanılarak daha gerçekçi bir matematik model yapılmıştır.

3.4.1. Enerji Dengesi Eşitlikleri

Bu modelde enerji dengesi eşitlikleri aşağıdaki gibi sistemin her bir elemanı için ayrı ayrı yazılmıştır. Modelleme Hottel-Willier modeli (Duffie ve Beckman, 1991) esas alınarak yapılmıştır.



Şekil 3-16 Hibrid sistemin modelinde varsayılan geometrik yapılandırma. S güneş pili, p yutucu yüzey, F akışkan, L tüm sistemin uzunluğu, δ yutucu yüzey (kanatçık) kalınlığı, D borunun çapı ve W bir birimin genişliğidir.

Şekil 3-16'daki sistem için çizilen bu geometrik yapılandırmada birim alan için 10mm'lik güneş modülünün 3mm'lik üst camından ışınım ve taşınım ile olan enerji kayıpları

$$q_{PV\ üstcam} = q_{gök,ışınım}(y) + q_{gök,taş.}(y) \quad (3-15)$$

$$q_{gök,ışınım}(y) = \varepsilon_{PVcam} \cdot \sigma \cdot (T_{PV\ üstcam}^4 - T_{gök}^4) \quad (3-16)$$

olarak yazılır.

Taşınım ile olan ısı kayıpları daha çok rüzgârın etkisinden kaynaklandığından PV modülün üstünden ısı kayıplarını aşağıdaki gibi yazabiliriz:

$$q_{gök,taş.}(y) = h_{rüzgar} \cdot (T_{PV\ üstcam} - T_{gök}) \quad (3-17)$$

Burada zorlanmış taşınım ile ısı iletimi hesabında McAdams'ın (1954) rüzgâr için tanımlanan empirik ısı transfer katsayısı $h_{rüzgar} = 5.7 + 3.8v_{rüzgar}$ kullanılmıştır.

Güneş modülü üst cam sıcaklığı ölçülmektedir ve gökyüzü sıcaklığı Schott'a göre (1985) açık gökyüzü koşullarında $T_{gök} = (T_a - \delta T)$, ($\delta T = 20K$) ve bulutluluk koşullarında $T_{gök} = T_a$ olarak alınır (Jones ve Underwood, 2000).

Aradaki hava aracılığıyla güneş modülünün yaklaşık 7mm'lik alt camından yutucu yüzeye (p) ışınım ve taşınım ile ısı transferi gerçekleşmektedir.

$$q_{PV\ altcam} = q_{hava,ışınım}(y) + q_{hava,taş.}(y) \quad (3-18)$$

$$q_{hava,işınım}(y) = \varepsilon_{PVcam} \cdot \sigma \cdot (T_p^4 - T_{PValtcam}^4) \quad (3-19)$$

$$q_{hava,taş}(y) = h_{PValtcam-p} \cdot (T_p - T_{PValtcam}) \quad (3-20)$$

Eğimli bir yüzeyde güneş modülünün alt camından yutucu yüzeye ısı iletim katsayısı $h_{PValtcam-p}$ 'nin hesaplanabilmesi için Nusselt sayısının hesaplanması gerekir.

$$Nu = \frac{hL}{k}$$

$0 \leq \beta \leq 75^\circ$ kolektör eğim açısı için

$$Nu = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708(\sin 1.8\beta)^{1.6}}{Ra \cdot \cos \beta} \right] \cdot \left[1 - \frac{1708}{Ra \cdot \cos \beta} \right]^+ + \left[\left(\frac{Ra \cdot \cos \beta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+ \quad (3-21)$$

bulunur (Duffie ve Beckman, 1991). “+” üst indisi parantez içi işlem sonucu pozitif ise hesaba katılacağı, negatif ise sıfır alınacağını belirtmektedir. Burada Rayleigh (Ra) sayısı

$$Ra = \frac{g\beta'\Delta TL^3}{\nu\alpha} \quad (3-22)$$

$$h_{PValtcam-p} = \frac{Nu \cdot k}{L} \quad (3-23)$$

olarak hesaplanır.

Yalıtım malzemesi aracılığıyla yutucu yüzeyden kasanın tabanına iletim ile ısı transferi:

$$q_{PU,iletim} = U_b (T_p - T_b) \quad (3-24)$$

$$U_b = \frac{1}{R_{yal.}} \quad ve \quad R_{yal.} = \frac{L_{yal.}}{k_{yal.}}$$

Burada yalıtım malzemesi poliüretan (PU) köpükten 50mm kalınlığında imal edilmiştir. Kollektör arka plakasından ısı kayıpları olduğu gibi kasanın yan yüzeylerinden de kayıplar ($U_e \Delta T$) olmaktadır. Yalıtım malzemesinin ısı iletimi çok düşük olduğu için alt kayıplar ihmal edilebilir ($U_L = U_i$). Dolayısıyla kollektörün üstünden olan kayıplarla bakır boru içinden geçen suya olan ısı transferi ele alınmıştır. Klein (1979) tarafından hem el ile hem de bilgisayar hesaplamaları için üst kayıp katsayısının ampirik formülü aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir:

$$U_i = \left\{ \frac{N}{\frac{C}{T_{pm}} \left[\frac{(T_{pm} - T_a)}{(N + f)} \right]^e} + \frac{1}{h_{rüzgar}} \right\}^{-1} \quad (3-25)$$

$$+ \frac{\sigma(T_{pm} + T_a)(T_{pm}^2 + T_a^2)}{(\varepsilon_p + 0,00591 \cdot N \cdot h_{rüzgar})^{-1} + \frac{2N + f - 1 + 0.133\varepsilon_p - N}{\varepsilon_{pv}}}$$

Bu eşitlikte N = cam örtü sayısı

$$f = (1 + 0.089h_{rüzgar} - 0.1166h_{rüzgar}\varepsilon_p)(1 + 0.07866N)$$

$$C = 520(1 - 0.000051\beta^2) \quad 0^\circ < \beta < 70^\circ \text{ için. } 70^\circ < \beta < 90^\circ \text{ için}$$

$\beta = 70^\circ$ kullanılır.

$$e = 0.430(1 - 100/T_{pm})$$

β = toplayıcı eğim açısı ($^{\circ}$)

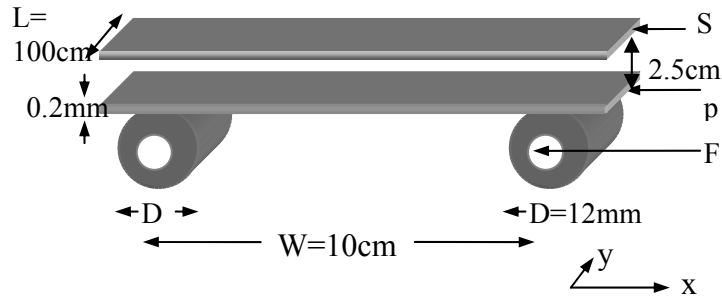
ε_{PV} = güneş modülünün yayma oranı

ε_p = yutucu yüzeyin yayma oranı

T_a = ortam sıcaklığı (K)

T_{pm} = ortalama yutucu yüzey sıcaklığı (K)

$h_{rüzgar}$ = rüzgâr ısı iletim katsayısı ($W/m^2^{\circ}C$)



Şekil 3-17 Yutucu yüzey ve boru boyutları

Bu çalışmada literatürdeki boru-kanatçık modelinden yola çıkılarak Şekil 3-17'de görüldüğü gibi, bir boru ve bir kanatçığın orta noktası olarak tanımlanan $x=0$ 'daki iki yarım parçası ele alınmıştır (Duffie ve Beckman, 1991). Basitlik için, kanatçıktaki tüm ısı taşınımının yutucu yüzeye doğru olduğu varsayımı yapılmıştır. Kanatçıktan boruya ısı taşınımı q'_{jin} 'i bulmak için Δx genişliğinde sonsuz küçük bir parça ele alınmıştır. Bu parça için enerji dengesi eşitliği

$$S \Delta x - U_L (T - T_a) \Delta x + \left(-k\delta \frac{dT}{dx} \right) \Big|_x - \left(-k\delta \frac{dT}{dx} \right) \Big|_{x+\Delta x} = 0 \quad (3-26)$$

S absorbe edilen güneş enerjisi, T kanatçık üzerindeki yutucu yüzeyin (x 'e bağımlı) sıcaklığı, k ısı iletkenlik ve δ absorbe eden kanatçığın kalınlığıdır. Eşitliği Δx 'e bölüp Δx sıfıra giderken limit alındığında aşağıdaki diferansiyel denklem elde edilir:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = \frac{U_L}{k\delta} \left(T - T_a - \frac{S}{U_L} \right) \quad (3-27)$$

Bu ikinci dereceden diferansiyel denklemin çözümü için boruların arasında tam orta noktada ve borunun yutucu yüzeye temas ettiği noktada olmak üzere iki sınır koşulu gerekmektedir:

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = 0 \text{ ve } T|_{x=(W-D)/2} = T_b \quad (3-28)$$

Denklemin çözümünü kolaylaştırmak için m ve Ψ gibi iki yeni değişken tanımlanmıştır:

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k\delta}} \quad (3-29a)$$

$$\Psi = T - T_a - S/U_L \quad (3-29b)$$

ve Eş.(3-27) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} - m^2\Psi = 0 \quad (3-30)$$

Bu diferansiyel denklemin sınır koşulları:

$$\left. \frac{d\Psi}{dx} \right|_{x=0} = 0 \text{ ve } \Psi \Big|_{x=(W-D)/2} = T_b - T_a - \frac{S}{U_L} \quad (3-31)$$

olur. Denklemin genel çözümü

$$\Psi = C_1 \sinh mx + C_2 \cosh mx \quad (3-32)$$

C_1 ve C_2 sabitleri sınır koşulları denklemin genel çözümünde yerine konularak bulunur. Sonuç

$$\frac{T - T_a - S/U_L}{T_b - T_a - S/U_L} = \frac{\cosh mx}{\cosh m(W-D)/2} \quad (3-33)$$

Akış yönünde birim uzunlukta kanatçıktan boruya getirilen ısı

$$q'_{fin} = -k\delta \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=(W-D)/2} = \frac{k\delta m}{U_L} [S - U_L(T_b - T_a)] \tanh m \frac{(W-D)}{2} \quad (3-34)$$

Tanımdan $k\delta m/U_L$ aslında $1/m$ 'ye eşittir. Eş.(3-34)'te belirtilen enerji borunun diğer tarafından da gelmektedir. Dolayısıyla, denklemi $(W-D)$ ile çarpıp böldüğümüzde ve iki yarı kanatçıktan boruya getirilen toplam ısıyı bulmak için de 2 ile çarptığımızda

$$q'_{fin} = -2k\delta \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=(W-D)/2} = (W-D)[S - U_L(T_b - T_a)] \frac{\tanh m(W-D)/2}{m(W-D)/2} \quad (3-35)$$

Eşitlik (3-35)'i bir kanatçık verimi tanımlayarak aşağıdaki gibi yeniden yazmak yerinde olur:

$$q'_{fin} = (W-D) \cdot F \cdot [S - U_L(T_b - T_a)] \quad (3-36)$$

Aşağıda tanımlanan F kanatçık verimi olarak adlandırılır

$$F = \frac{\tanh[m(W - D)/2]}{m(W - D)/2} \quad (3-37)$$

ve bu faktör ısının yutucu yüzey aracılığıyla kanatçıktan boruya ne kadar etkili aktarıldığının bir ölçüsüdür.

Borunun üzerindeki yutucu yüzeyden alınacak yararlı enerji

$$q'_{boru} = D \cdot [S - U_L(T_b - T_a)] \quad (3-38)$$

ve birim uzunlukta boru ile kanatçıktan akış yönünde alınacak yararlı ısı Eş. (3-36) ve (3-38)'in toplamı kadardır:

$$q'_u = [(W - D)F + D][S - U_L(T_b - T_a)] \quad (3-39)$$

Eş. (3-39)'daki yararlı ısının akışkana iletilmesi gerekir. Akışkana doğru olan ısı akışına gösterilen direnç boru ile yutucu yüzey arasındaki bağ direnci ve boru-akışkan direncinden oluşmaktadır. Akışkana aktarılacak enerji miktarı itici güç olan sıcaklık farkının ısı akışına gösterilen dirence bölümüyle hesaplanır:

$$q'_u = \frac{(T_b - T_f)}{\frac{1}{h_{fi}\pi D_i} + \frac{1}{C_b}} \quad (3-40)$$

burada D_i boru iç çapı, h_{fi} akışkan ile boru duvarı arasındaki ısı iletim katsayısıdır. Bağ iletkenliği C_b ise, bağlama malzemesinin ısı iletkenliği (k_b), kalınlığı (γ) ve genişliğinin (b) bir fonksiyonudur:

$$C_b = \frac{k_b \cdot b}{\gamma} \quad (3-41)$$

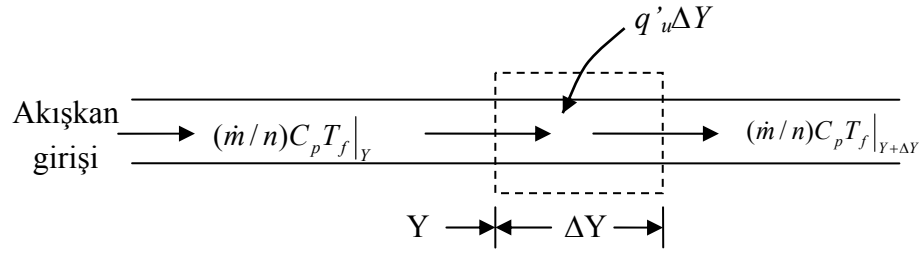
Bağlama malzemesinin sıcaklığı T_b yerine bilinen fiziksel parametreler ve ölçülen sıcaklık değerlerini yazarak yararlı ısı ile ilgili eşitliği düzenlemek daha doğru olacaktır. Eş.(3-40)'tan T_b 'yi çekip Eş.(3.39)'da yerine koyduğumuzda yararlı ısı eşitliği aşağıdaki gibi olacaktır:

$$q'_u = W \cdot F'[S - U_L(T_f - T_a)] \quad (3-42)$$

Burada F' olarak tanımlanan toplayıcı verim faktörü:

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[\frac{1}{U_L [D + (W - D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right]} \quad (3-43)$$

Toplayıcı verim faktörü F' belirli bir bölgedeki gerçek yararlı ısının toplayıcı yutucu yüzeyi o bölgedeki akışkan sıcaklığında olsaydı elde edecek yararlı ısıya oranıdır. F' , bir miktar sıcaklık bağımlılığı olan U_L ve h_{fi} 'nin bir fonksiyonudur, ancak belirgin olarak sıcaklığın bir fonksiyonu değildir. F' 'nün hesaplanmasında, bağ iletkenliği yüksek, dolayısıyla direnci düşük olduğu için $1/C_b$ ihmal edilebilir (Duffie ve Beckman, 1991).



Şekil 3-18 Akışkan üzerindeki enerji dengesi

Eş.(3-42)'den hesaplanan birim akış uzunluğundaki yararlı ısı akışkana iletilir. Akışkan kollektöre T_{fi} sıcaklığında girer ve çıkışta T_{fo} sıcaklığına yükselir. Şekil 3-18'deki Δy uzunluğundaki tek bir borudan geçen akışkanı ele alırsak buradaki enerji dengesini aşağıdaki gibi yazabiliriz:

$$\left(\frac{\dot{m}}{n}\right)C_p T_f \Big|_y - \left(\frac{\dot{m}}{n}\right)C_p T_f \Big|_{y+\Delta y} + \Delta y \cdot q'_u = 0 \quad (3-44)$$

\dot{m} toplam toplayıcı debisi ve n paralel boru sayısıdır. Eşitliği Δy ' ye bölüp Δy sıfıra giderken limit aldığımızda, y yönünde, akışkanın sonsuz küçük bir parçası için aşağıdaki denge eşitliği elde edilir:

$$\dot{m}C_p \frac{dT_f}{dy} - nWF' [S - U_L (T_f - T_a)] = 0 \quad (3-45)$$

F' ve U_L 'nin konuma bağlı olmadığı varsayımıyla herhangi bir y konumunda giriş sıcaklığı için çözüm

$$\frac{T_f - T_a - S/U_L}{T_{fi} - T_a - S/U_L} = \exp(-U_L nWF'y / \dot{m}C_p) \quad (3-46)$$

Akış yönündeki toplayıcı uzunluğu L ise akışkan çıkış sıcaklığı T_{fo} 'nun hesaplanması için Eş(3-46)'da y yerine L konulur. Burada nWL çarpımı toplayıcı alanıdır.

$$\frac{T_{fo} - T_a - S/U_L}{T_{fi} - T_a - S/U_L} = \exp(-A_c U_L F' / \dot{m} C_p) \quad (3-47)$$

Toplayıcıda gerçekten elde edilen yararlı ısının toplayıcı yüzeyinin akışkan giriş sıcaklığında olması durumunda elde edilebilecek yararlı ısıya oranı olarak tanımlanan toplayıcı ısı kazanım faktörü, F_R :

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p (T_{fo} - T_{fi})}{A_c [S - U_L (T_{fi} - T_a)]} \quad (3-48)$$

Eş.(3-47)'deki ifadeden yararlanacak şekilde Eş.(3-48)'i düzenlersek toplayıcı ısı kazanım faktörünü aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz:

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m} C_p}\right) \right] \quad (3-49)$$

Eş.(3-49)'un grafiksel olarak yorumlanabilmesi için kollektör akış faktörü, F'' tanımlanmıştır:

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m} C_p}{A_c U_L F'} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m} C_p}\right) \right] \quad (3-50)$$

Toplayıcı ısı kazanım faktörü, F_R , toplayıcıda gerçekten elde edilen yararlı ısının toplayıcı yüzeyinin akışkan giriş sıcaklığında olması durumunda elde edilebilecek yararlı ısıya oranı olarak tanımlanmıştı ki bu

da olası maksimum ısı transferidir. Toplayıcı ısı kazanım faktörü ile bu olası maksimum ısı transferinin çarpımı toplayıcıdan elde edilebilecek gerçek yararlı ısı kazancı Q_u 'dur.

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L (T_i - T_a)] \quad (3-51)$$

Toplayıcı yüzey alanı A_c ile güneş pili yüzey alanı A_{PV} eşit olduğu için eşitliklerde birbiri yerine kullanılmıştır. Burada akışkan giriş sıcaklığı T_{fi} yerine giriş sıcaklığı T_i gösterimi kullanılmıştır. Bunun nedeni güneş enerjili sistemlerde giriş suyu sıcaklığının ölçülüyor olmasıdır. Toplayıcı ısı kazanım çarpanı tüm toplayıcı yüzeyi giriş sıcaklığında olsaydı elde edilecek yararlı ısının gerçekte elde edilecek yararlı ısıya düşürülmesini sağlar. Kütleli debi arttıkça borular boyunca sıcaklık değişimi az olacaktır. Dolayısıyla, ortalama toplayıcı yüzey sıcaklığı düştüğü için kayıplar da azalacaktır. Kütleli debinin artması toplayıcı ısı kazanım faktörü, F_R 'nin artmasına neden olur.

Toplayıcı verimini belirlemek için toplam kayıp katsayısını ve akışkan ısı iletim katsayısını bilmemiz gerekmektedir. U_L ve h_{fi} sıcaklığa bağlıdır. Klein (1974) tarafından elde edilen aşağıdaki eşitlikle ortalama akışkan sıcaklığı hesaplanabilir (Duffie ve Bekman, 1991):

$$T_{fm} = T_{fi} + \frac{Q_u / A_c}{F_R U_L} (1 - F^n) \quad (3-52)$$

Ortalama yutucu yüzey sıcaklığı toplayıcıdan elde edilebilecek yararlı ısının hesaplanmasında kullanılır:

$$Q_u = A_c [S - U_L (T_{pm} - T_a)] \quad (3-53)$$

Eş.(3-51) ile (3-53)'ü eşitleyip ortalama yutucu yüzey sıcaklığı için çözersek aşağıdaki eşitliği elde ederiz:

$$T_{pm} = T_{fi} + \frac{Q_u / A_c}{F_R U_L} (1 - F_R) \quad (3-54)$$

Eş.(3-54) iteratif yöntem ile çözülebilir. Ortalama yutucu yüzey sıcaklığı için bir tahmin yapıp U_L çözülür. F_R , F'' ve Q_u için elde edilen yaklaşık değerlerle Eş.(3-54)'ten yeni bir üst kayıp katsayısı hesaplanır. U_L 'nin bu yeni değeri ile F_R ve F'' yeniden hesaplanır. İyi bir başlangıç tahmini ile ikinci iterasyona çoğu zaman gerek kalmaz. Kütleli debisi 0.01 ile 0.02 kg/m²s arasında olan sıvılı toplayıcılarda T_p için başlangıç tahmini $T_{fi} + 10^\circ\text{C}$ 'dir (Duffie ve Bekman, 1991).

3.5. Kullanılan Yöntem

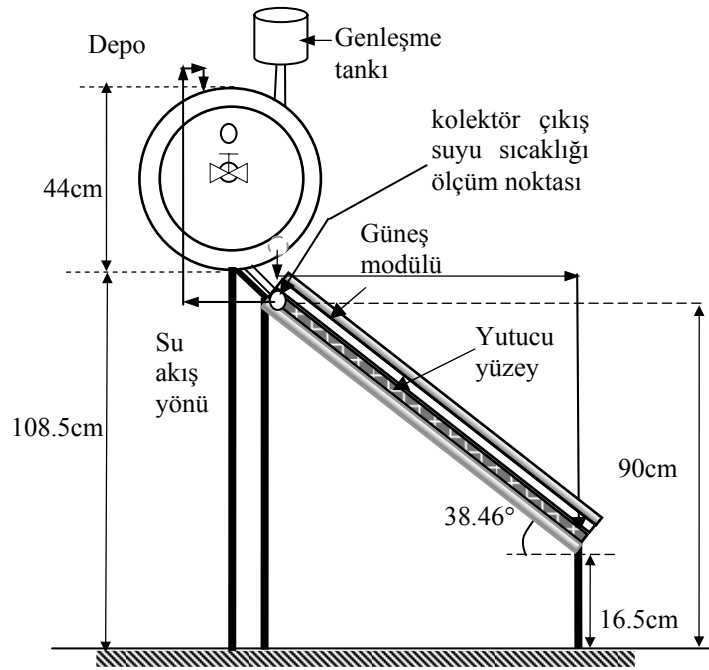
Bu tez projesinde ana materyal güneş pili ve termal toplayıcıdır. Her iki dönüştürücünün değişik üretim yöntemleri ile üretilmiş birçok çeşidi vardır. Bu dönüştürücülerin özellikleri incelenerek birbirini en iyi tamamlayan türler seçilmiştir. Bu iki dönüştürücü birleştirildiğinde biri güneşe daha yakın olacak ve güneşten gelen enerjinin büyük kısmını öncelikle kullanacaktır. İkincisi ise artık enerji ile yetinmek zorunda kalacaktır. Yapılarından dolayı termal toplayıcılar güneş ışığını geçirmediğinden üste güneş pilleri yerleştirilmiştir. Bu sebepten dolayı güneş pillerinin dönüşüm veriminde düşme beklenmemektedir. Termal toplayıcılar ise artık enerji ile yetinecekleri için dönüşüm verimlerinde belirgin bir düşüş beklenmektedir.

PV/T hibrid sistemde kapalı çevrim, doğal dolaşimli, basınçlı depolu bir güneş kollektörü tasarımı yapılmış ve üst örtü olarak %10 geçirgen bir a-Si güneş modülü kullanılmıştır. Basınçlı sistemlerde soğuk su beslemesi, ilave bir şamandıralı depo olmaksızın direkt şebekeden sıcak su deposu içerisine yapılır. Dolayısıyla sistem daha çalışmaya başlamadan şebeke basıncına ulaşır. Sistem çalışmaya başladığında da sıcaklık arttıkça basınç da artar. Kapalı kaplar prensibine göre de basınç arttıkça deponun içindeki suyun sıcaklığı diğer şamandıralı sistemlere göre daha yüksek değerlere ulaşır. Kurulan sistem Şekil 3-19'da görülmektedir.

Basınçlı sistemlerin şamandıralı sistemlere göre avantajı, kullanım yerinde sıcak suyun soğuk su ile aynı veya daha yüksek basınçta olmasıdır. Şamandıralı sistemlerde sıcak su basıncı sadece depo seviyesi ile kullanım yeri arasındaki kot farkından kaynaklanan statik basınç kadardır. Bu ise tesisatta soğuk suyun sıcak suyu yukarıya ötelemesine, soğuk ve sıcak suyun şebeke basınçlarının birbirinden farklı olmasından dolayı dengesiz bir sıcaklıkta, su akışına neden olmaktadır.



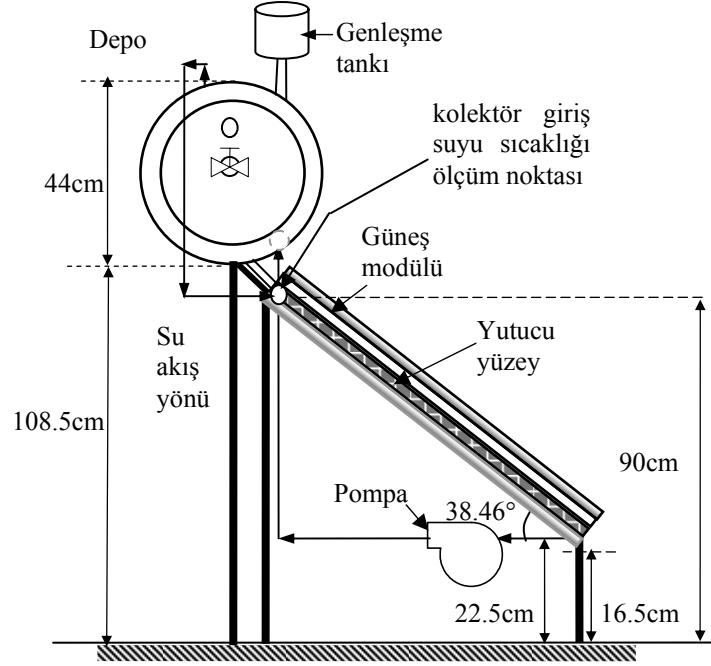
a)



b)

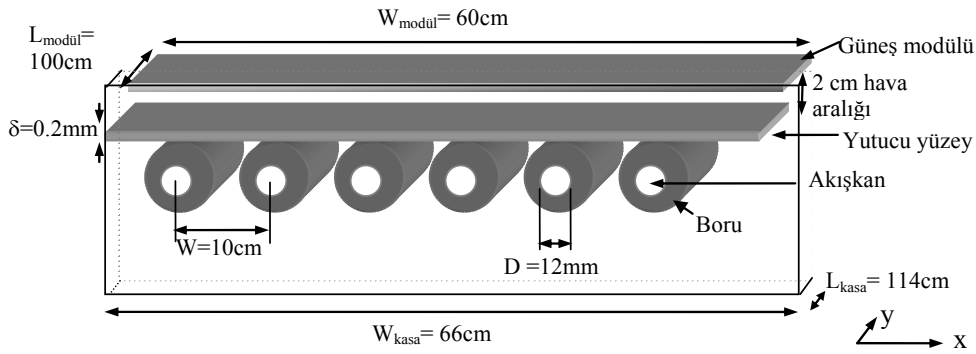
Şekil 3-19 a) PV/T hibrid sistemin görünüşü, b) sistem şematik çizimi

Sistem verimini etkileyen faktörlerden biri olan debinin etkisinin incelenebilmesi için doğal dolaşımın yanı sıra zorlanmış dolaşım olarak çalıştırmak için sisteme pompa da eklenmiştir. Pompalı sistem Şekil 3-20’de görülmektedir.

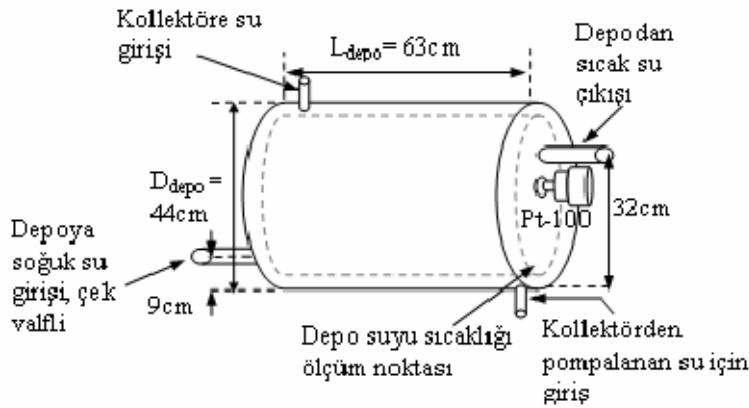


Şekil 3-20 Pompa ile çalıştırılan PV/T hibrid sistemin şematik çizimi.

Yutucu yüzey, toplayıcı boruları, kasa ve güneş modülü boyutlarının gösterildiği PV/T kollektörün yapım ayrıntıları Şekil 3-21’de ve kullanılan sıcak su deposuna ait çizim Şekil 3-22’dedir.



Şekil 3-21 PV/T kollektörün yapım ayrıntıları



Şekil 3-22 Sıcak su deposunun yapım ayrıntıları

Dönüştürücülere ek olarak bu araştırmada dönüştürücülerin davranışlarını tüm bir yıl içinde sürekli izlemek için bir ölçüm sistemine gereksinim duyulmuştur. Ölçüm sistemi verileri istenilen sıklıkta kaydedebilen ve bilgisayara aktarabilen bir veri toplayıcı (datalogger) ile verileri elde eden sensörlerden ve sensörlerin elde ettiği işaretleri düzenleyen elektronik devrelerden oluşmaktadır.

PV/T sistemin performansının belirlenebilmesi için her iki tür dönüştürücünün verimlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için güneş modülünün ve termal toplayıcının verimlerinin ölçülmesi gerekmektedir.

Güneş modülün veriminin belirlenebilmesi için elektriksel karakteristiklerinin ölçülmesi gerekir. Güneş modülünün açık devre gerilimi ve kısa devre akımını ölçmek için bir akım sensörü kullanılmıştır. Güneş pili yüzeyine gelen ışınım ise pironometre ile ölçülerek verim

$$\eta_0 = \frac{\text{Bir PV'den elde edilebilecek maksimum verim}}{\text{Gelen güneş enerjisi}} \quad (3-55)$$

olarak hesaplanır.

Termal toplayıcılar, yutucu yüzey tarafından gelen güneş enerjisinin bir akışkana aktarıldığı dönüştürücülerdir. Yutucu yüzey tarafından absorblanan enerjinin bir kısmı yararlı ısıya dönüşürken bir kısmı da taşınım ve iletim yoluyla kaybolacaktır. Bir kollektörün birim alanı tarafından absorbe edilen güneş ışınımı, S , gelen güneş ışınımı ve optik kayıplar arasındaki farka eşittir. Kollektörden iletim, taşınım ve infrared ışınım ile olan ısı enerjisi kayıpları, ısı iletim katsayısı U_L ile yutucu yüzey ortalama sıcaklığı T_{pm} ve ortam sıcaklığı T_a arasındaki farkın çarpımı ile bulunur.

Eş. (3-54)'te belirtildiği gibi, kararlı durumda, A_c alanına sahip bir kollektörün yararlı enerji çıkışı absorbe edilen güneş ışınımı, S ile ısı kayıplar arasındaki farktır (Eş. 3-51).

Bu eşitlikteki problem, ortalama yutucu yüzey plaka sıcaklığının hesaplanabilmesi ve ölçülebilmesinin zorluğudur. Çünkü bu değer kollektör tasarımı, gelen güneş ışınımı ve akışkan giriş sıcaklığının bir fonksiyonudur. Dolayısıyla, bu sıcaklık değerlerini ölçerek ısı kayıpları hesaplayamayız. Bu nedenle yararlı ısının akışkan giriş sıcaklığı ve kollektör ısı kazanım

faktörü, F_R , adı verilen ve analitik olarak hesaplanabilen yada deneysel olarak ölçülebilen bir parametre cinsinden ifade edilmesi gerekir.

Toplayıcı veriminin hesaplanabilmesi için kolektör yutucu yüzeyi tarafından soğurulan (absorbe edilen) güneş enerjisi S 'nin hesaplanması gerekir. Eğer güneş ışınımının direk (I_b) ve difüz (I_d) bileşenleri ölçülüyorsa

$$S = I_b R_b (\tau\alpha)_b + I_d (\tau\alpha)_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \varphi_g (I_b + I_d) (\tau\alpha)_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (3-56)$$

olarak hesaplanır. Sadece toplam ışınım I_T ölçülüyorsa;

$$S = (\tau\alpha)_{ort} I_T \quad (3-57)$$

yaklaşımı yapılabilir. Ortalama yutma-geçirme çarpımı

$$(\tau\alpha)_{ort} \cong 0.96(\tau\alpha)_b \quad (3-58)$$

olarak hesaplanabilir. Belirli saat aralığında güneş geliş açısı θ' ya göre α/α_n bulunur (Duffie ve Beckman, 1991, s.210, Şekil 4.11.1). Örtü için KL çarpımı hesaplanarak buna göre τ bulunur (Duffie ve Beckman, 1991, s.225, Şekil 5.3.1) ve aşağıdaki eşitlikten

$$(\tau\alpha)_b = 1.01 \cdot \tau \cdot \frac{\alpha}{\alpha_n} \cdot \alpha_n \quad (3-59)$$

hesaplanır (Duffie ve Beckman, 1991).

Termal toplayıcının verimi ise, belirli bir zaman aralığında ($d\tau$) sistemden çekilen ısının gelen güneş ışınımına oranı olarak tanımlandığından verim,

$$\eta_{th} = \frac{\int Q_u d\tau}{A_c \int_0^{\tau} G d\tau} \quad (3-60)$$

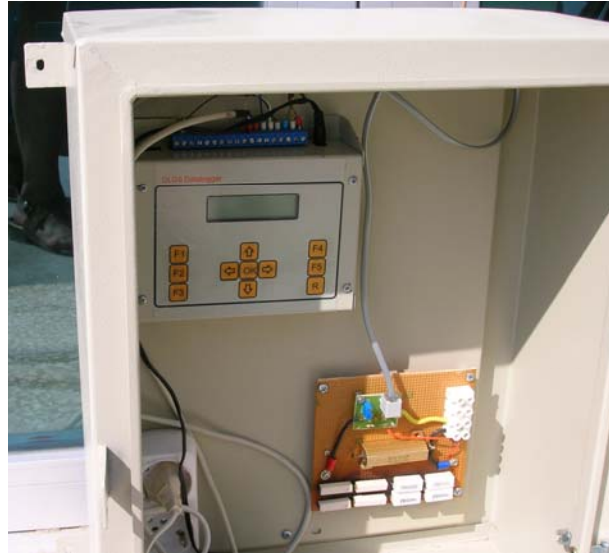
eşitliğinden hesaplanır. Burada Q_u sistemden alınan yararlı ısıdır ve kollektör modellemesinde değinildiği gibi, yutucu yüzey sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki fark ile doğru orantılıdır. Dolayısıyla, bu sıcaklıkların sıcaklık sensörleriyle ölçülerek ya da hesaplanarak belirlenmesi gerekir.

3.6. Kollektör Sıcaklıklarının Ölçülmesi

Kollektör veriminin belirlenmesi için kollektör giriş ve çıkış suyu sıcaklıklarının ve depo suyu sıcaklığının ölçümünde doğrusallığının oldukça iyi olmasından dolayı platinden yapılmış 0°C 'de 100Ω direnç değeri gösteren Pt-100 seçilmiştir. -260 ile $+650^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında çalışan bu sensörün sıcaklıkla direnç değişimi Wheatstone köprüsü ile ölçülmüştür. Köprünün dc çıkış gerilimi datalogger girişi için yeteri kadar yüksek olmadığından enstrümantasyon yükseltici ile $0-100^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığı için $0-5\text{V}$ değerine yükseltilmiştir. Konuyla ilgili makaleler incelendiğinde, hibrid sistemde kullanılan kollektörün giriş ve çıkış suyu sıcaklıklarının bu aralıkta değerler alabileceği belirlendiği için devre tasarımı da bu değerler için yapılmış ve alınan sonuçlara göre de bu değerlerin aşılmadığı görülmüştür.

Hibrid sistemdeki güneş pili veriminde bir artış olup olmadığının belirlenebilmesi için hücre sıcaklığının ölçülmesinde LM35 sıcaklık sensörü kullanılmıştır. $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ duyarlılığına sahip bu yarıiletken sıcaklık sensörünün çıkışı da datalogger'a bağlanarak kaydedilmiştir.

Veriler önce 2 dakikalık aralıklarla alınmış ve Microsoft Excel programına aktarılmıştır. Pt-100 ile sıcaklık ölçümünde kullanılan devrenin çıkış gerilimini sıcaklık değerine dönüştürmek için hesaplanan sıcaklık çarpanları kullanılmıştır. Bu hesaplanan kollektör giriş ve çıkış suyu sıcaklık değerlerinin saatlik ortalamaları alınarak zamana karşı çizdirilmiştir. Kollektör giriş ve çıkış suyu sıcaklıklarının saatlik ortalamaları arasındaki farkın ışıyım şiddetine oranı hesaplanarak kollektör veriminin çizdirilmesi sağlanmıştır. Sıcaklığın yavaş değişen bir parametre olmasından dolayı veri toplama sıklığı 2 dakikadan 10 dakikaya çıkarılmış ve datalogger belleğinin yaklaşık 1 haftalık veriyi depolayabilmesi sağlanmıştır. Şekil 3-23'te bu veri toplama ünitesi görülmektedir.



Şekil 3-23 Verilerin saklanmasında kullanılan veri toplama ünitesi

Sıcaklık ölçümünde kullanılan sıcaklık algılayıcı RTD'nin çalışması, sıcaklıkla dirençteki değişimin ölçülmesi ve bu ölçümün datalogger girişine uygun hale getirilmesi için kullanılan sinyal uygunlaştırma devreleri aşağıda verilmiştir.

3.6.1. RTD – Dirençsel Sıcaklık Algılayıcı

Bir metalin direncinin sıcaklıkla artması olgusu dirençsel sıcaklık algılayıcının temelini oluşturur. Saf metaller için sıcaklık-direnç ilişkisi şöyledir:

$$R_t = R_0 (1 + at + bt^2 + ct^3 + \dots) \quad (3-61)$$

R_0 : Referans sıcaklığındaki direnç (genellikle 0°C 'de), Ω

R_t : t sıcaklığındaki direnç, Ω

a : direncin sıcaklık katsayısı, $\Omega/\Omega(^\circ\text{C})$

b ve c : bir veya daha fazla bilinen kalibrasyon noktalarına göre hesaplanan katsayılar.

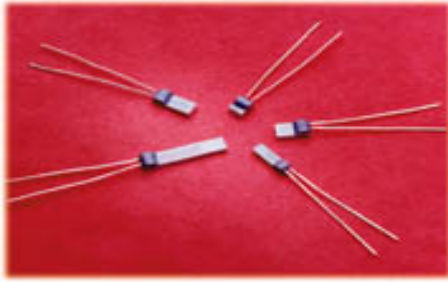
Pt-100 sıcaklık sensörleri için DIN EN 60751 standardına göre direnç-sıcaklık ilişkisi Tablo 3-5'te verilen eşitliklerle hesaplanır.

Tablo 3-5

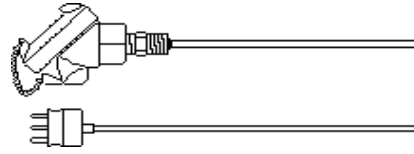
$t \geq 0^\circ\text{C}$:	$t < 0^\circ\text{C}$:
$R_t = R_0 (1 + a \cdot t + b \cdot t^2)$	$R_t = R_0 (1 + a \cdot t + b \cdot t^2 + c \cdot (t - 100) \cdot t^3)$
$R_0 = 100 \Omega$	$R_0 = 100 \Omega$
$a = 3.9083 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$a = 3.9083 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
$b = -5.775 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$	$b = -5.775 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$
$c = 0$	$c = -4.183 \cdot 10^{-13} \text{ } ^\circ\text{C}$

RTD'nin direnç değeri büyük olduğunda sistemdeki hata miktarı küçük olduğundan, pratik RTD'nin yapımında yüksek dirençli metaller kullanılır. En çok kullanılan RTD'ler demir, platin, nikel, %70 nikel - %30 demir (Balco), veya bakır gibi malzemelerden imal edilmektedir. RTD malzemeleri içinde en doğrusal yanıtı veren platindir. Bu etki daha çok 650°C'ye kadar olan sıcaklıklarda kendini göstermektedir. En çok bilinen değer platin için 0°C'ta 100Ω'dur ve ticari olarak Pt-100 olarak anılır. Tablo 3-6'da çeşitli RTD elemanlarının yapıldığı malzemeler, direnç değerleri ve doğruluklarına ilişkin bilgiler verilmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan Pt-100'e ait teknik veriler Ek 3'tedir.

Şekil 3-24'te RTD elemanları ve sıvı sıcaklıklarını ölçmek için üretilen RTD propları gösterilmiştir.



(a) Platin film RTD'ler



(b) RTD probu

Şekil 3-24

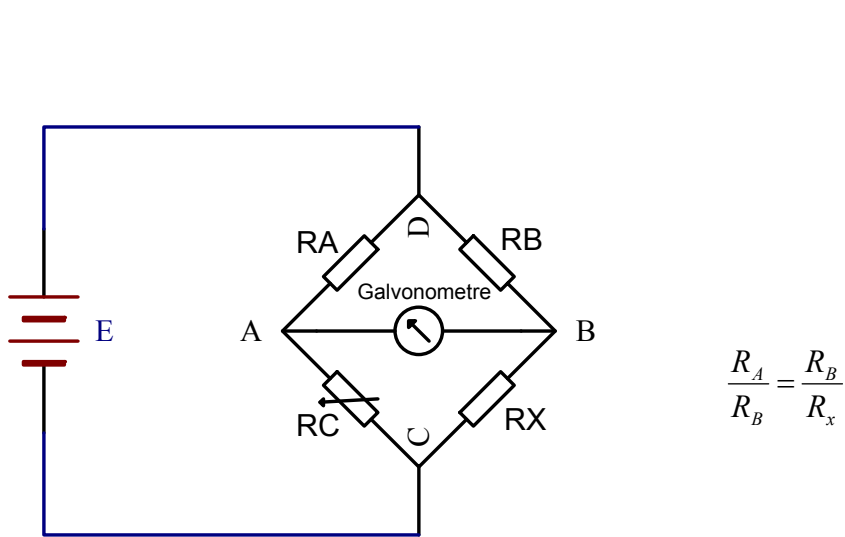
Tablo 3-6

RTD Elemanları	
Malzemeler	Platin, Bakır, Nikel, Nikel-Demir
Değerler:	Platin (100, 200, 500, 1000 ohm) Bakır (10 ohm) Nikel (120 ohm) Nikel-Demir (604 ohm)
Doğrulukları:	Platin ($\pm\%0.12$, $\pm\%0.1$, $\pm\%0.03$, $\pm\%0.01$ 0°C'ta) Diğerleri ($\pm\%0.2$ 'den $\pm\%0.5$ 'e)

RTD'lerin başlangıçtaki dirençlerinin küçük olması ve buna bağlı olarak direnç değişiminin de küçük olacağı göz önüne alınırsa ölçme yapacak aletin bağlantı uçlarının ölçüm sonucu üzerinde önemli bir etkisi olur. Bu sorunu önlemenin klasik yöntemlerinden biri Wheatstone köprüsüdür.

Wheatstone köprüsü elektrik ve elektronik alanında uzun zamandır standart bir ölçüm aygıtı olmuştur. Direnç değerlerini yüksek doğrulukla ölçebilme özelliğinden dolayı otomasyon ve işlem denetiminde gereksinimlere uygun hale getirilerek kullanılan önemli bir ölçme devresidir.

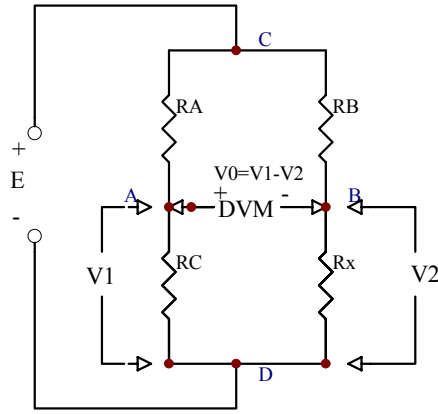
Şekil 3-25'teki devre direnç ölçümünde kullanılan temel bir Wheatstone köprüsü bağlantısını göstermektedir. Köprünün iki çift ucu vardır. C ve D uçları bir besleme gerilimi kaynağına bağlanırken, A ve B uçları duyarlı bir galvanometreye bağlıdır. R_A ve R_B dirençleri genellikle eşittir ve devre akımını sınırlamak ve denetlemek için oldukça yüksek değerdedir. R_C bir hassasiyet potansiyometresidir. R_x ise ölçülecek dirençtir.



Şekil 3-25 Wheatstone köprüsü

Devreyi ölçme için kullanırken, R_C direnci köprünün galvanometre ayağındaki akımı sıfırlamak için ayarlanır. Buna köprünün denge koşulu denir. R_x direnci Şekil 3-25'deki eşitlikten bulunabilir. $R_A = R_B$ olarak seçildiği durumda $R_C = R_x$ olur ve direnç değeri potansiyometrenin kalibre edilmiş kademaları üzerinden doğrudan okunabilir. Ancak bu yöntemle direnç değerinin okunması otomatik kontrolde kullanılamaz.

Endüstriyel uygulamalarda Wheatstone köprüsündeki galvanometre yerine yüksek giriş empedanslı bir kontrol aygıtı, kaydedici, datalogger, vb. bir enstrüman bağlanır. Köprü çıkışındaki V_o gerilimi bu enstrümanlara aktarılır - ki bu da doğrudan R_x ile orantılıdır. V_o ile R_x arasındaki ilişkiyi Şekil 3-26'daki devre ile gösterebiliriz. Ancak çoğu zaman köprü çıkış gerilimi iletilmek için yeterli bir dc seviyede değildir ve dolayısıyla yükseltilmesi gerekir.

Şekil 3-26 R_x 'in bulunması

Köprü devresindeki dirençler matematiksel hesaplamaları basitleştirmek için yeniden düzenlenmiştir. R_A ve R_B eşittir. Köprü R_x 'in belirli bir değeri için tasarlanmıştır ve R_C set noktasında R_x 'e eşit olacak şekilde seçilmiş veya ayarlanmıştır.

V_1 , E besleme geriliminin yarısına eşittir ve V_2 iki dirençli bir gerilim bölücü formülünden hesaplanabilir.

$$V_2 = \frac{R_C \times E}{R_C + R_x}$$

$$V_1 = \frac{E}{2}$$

$$V_0 = V_1 - V_2$$

(3-62)

Üç Telli Köprü

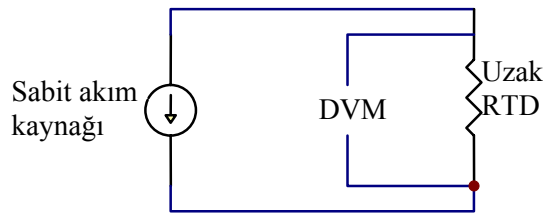
Köprü devresini yüksek sıcaklıktaki bir ortamdan korumak amacıyla, Pt-100'ü uzağa taşımak için kablolar kullanmak gerekir ki bu durumda da kablo dirençleri devreye eklenmektedir.

tablosu kullanmak gerekir. RTD'lerin sıcaklıkla direnç değişimlerinin ölçülmesinde kullanıldığında, üç telli köprü kendi doğrusal olmayan karakteristiğini RTD'ninkine eklemektedir ve uç direncinin etkisini gidermek için hesaplamalara gerek vardır. Devrenin çıkış gerilimi arttıkça doğruluk azalacaktır.

Dört Telli Direnç Ölçümleri

Sabit akım kaynağı bir dirence bağlanırsa, dirençteki gerilim düşümü dirençle doğru orantılıdır. Ohm kanununun bu basit ifadesi RTD'ler, gerilme göstergeleri ve diğer dirençsel sensörlerin direncini ölçmek için çok doğru bir yöntem sağlar.

Devre Şekil 3-28'de gösterilmiştir. Akım kaynakları op-amp'lar kullanılarak kolaylıkla kurulabilir. Bunlar düşük maliyetle entegre devre olarak da bulunmaktadır. Akım kaynağı herhangi bir büyüklükteki yüke sabit akım sağlayabilecek kapasitededir. Akım, yükün büyüklüğü artsa ya da azalsa bile sabit kalacaktır. Dolayısıyla, yükün üzerindeki gerilim değişecektir. DVM ile ölçülen çıkış gerilimi RTD direnci ile doğru orantılıdır ve uçların uzunluğundan etkilenmez. Üç yerine dört tel kullanmakla sistemin doğruluğu artacaktır.



Şekil 3-28 Sabit akım kaynağı ile dört telli direnç ölçümü kablo uzunluk sorunlarının olmadığı mükemmel bir doğruluk sağlar.

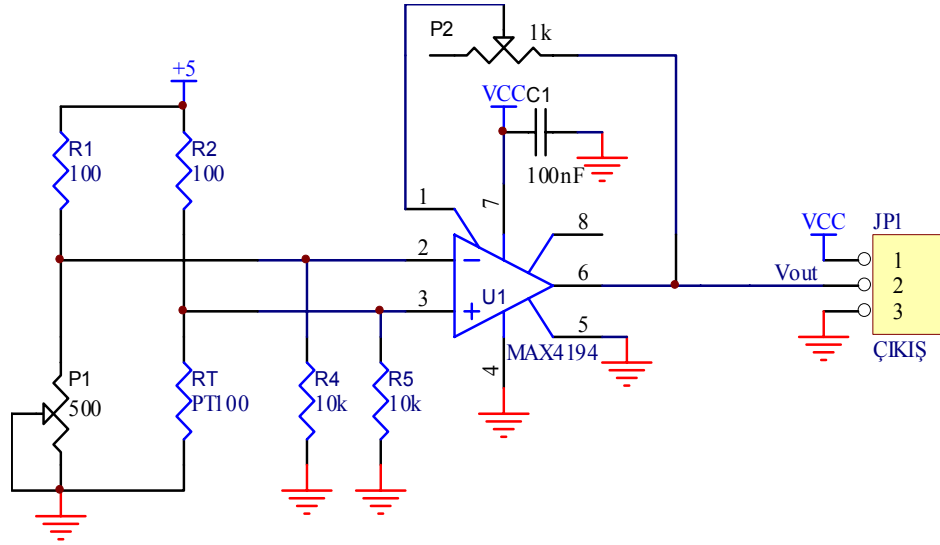
Algılama uçları akım taşımaz, dolayısıyla uç dirençlerinin önemi yoktur. Ölçülen gerilim doğrudan dirençsel sensörün üzerindeki gerilimdir. Bu yüzden, akım döngüsünün uç dirençlerindeki gerilim düşümleri de önemli değildir. Bu basit yöntem herhangi bir uzaklıkta doğruluk sağlar.

RTD'den geçen ölçüm için gerekli akım ısınmaya yol açar ki bu da sistemde bir hataya neden olur. Bu nedenle, doğru ölçümün yapılabileceği olası en küçük uyarma akımı kullanılmalıdır.

3.5.2. Kollektör Sıcaklıklarının Ölçülmesinde Kullanılan Devreler

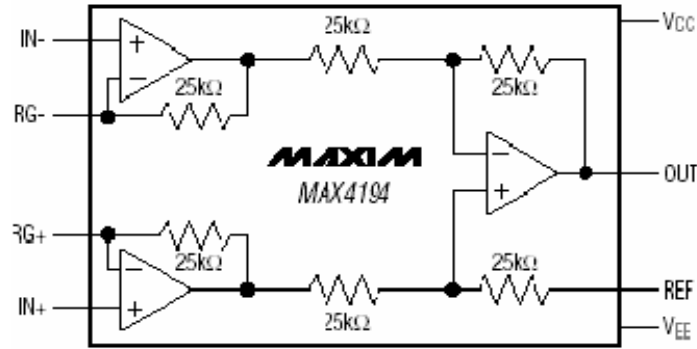
Wheatstone Köprüsü ile Ölçme

Pt-100 ile sıcaklık ölçümü için bir Wheatstone köprüsü kurulmuş, ölçüm doğrudan Pt-100 probunun kafa kısmının içinde yapıp datalogger'a 0-5V'luk gerilim olarak aktarıldığı için üç telli direnç ölçüm tekniğinin kullanılmasına gereksinim duyulmamıştır. Köprü çıkışı kazancı ayarlanabilen bir enstrümantasyon yükselteci olan MAX 4194 ile 0-5V aralığına yükseltilmiştir. Şekil 3-29'da bu sinyal uygunlaştırma devresi gösterilmektedir.

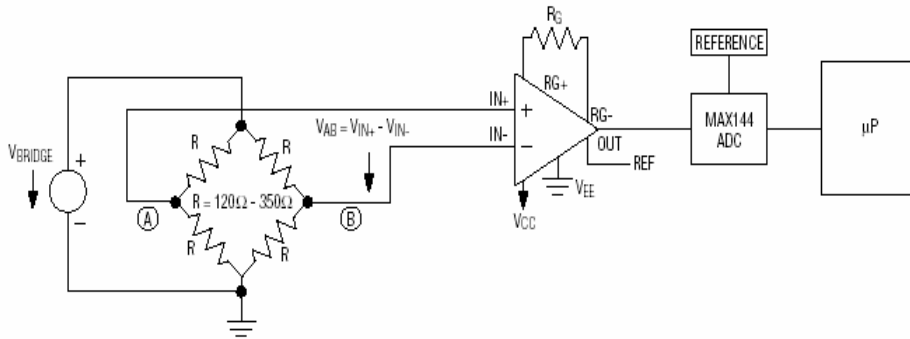


Şekil 3-29 Pt-100 ile sıcaklık ölçümünde kullanılan Wheatstone köprüsü ve enstrümantasyon yükseltici ile köprü çıkış geriliminin 0-5V aralığına yükseltilmesi.

Şekil 3-30'da içyapısı görülen MAX 4194 entegresi ayarlanabilir kazançlı, yüksek ortak mod bastırma oranına sahip (CMRR=115dB), 2.7V ile 7.5V aralığındaki tek bir kaynaktan beslenebilen, düşük güç tüketimine sahip bir enstrümantasyon yükselticidir ve Wheatstone köprüsünün çıkışındaki fark gerilimini yükseltmek amacıyla kullanılmıştır. Köprü çıkış gerilimi IN- ve IN+ girişlerine bağlanmış ve RG- ile RG+ girişleri arasında 1kΩ'luk hassas bir potansiyometre bağlanarak kazanç ayarı yapılmıştır. Bir köprü devresinin çıkış geriliminin enstrümantasyon yükselticine ve yükselteç çıkışının da bir ADC aracılığıyla mikroişlemciye aktarılmasını gösteren örnek uygulama devresi Şekil 3-31'dedir.



Şekil 3-30 MAX 4194 enstrümantasyon yükseltecinin iç yapısı.



Şekil 3-31 Köprü devresinin MAX 4194'e bağlantısı

OUT çıkışından alınan sinyal datalogger'a aktarılarak 12 bitlik bir ADC aracılığıyla sayısal sinyale dönüştürülerek seçilen zaman aralıklarında alınan değerler belleğe aktarılmıştır. Datalogger belleğinden alınan veriler bilgisayara aktarılıp Microsoft Excel dosyasına dönüştürülerek değerlendirilmek üzere saklanmıştır.

Tablo 3-7 Sıcaklık çarpanları

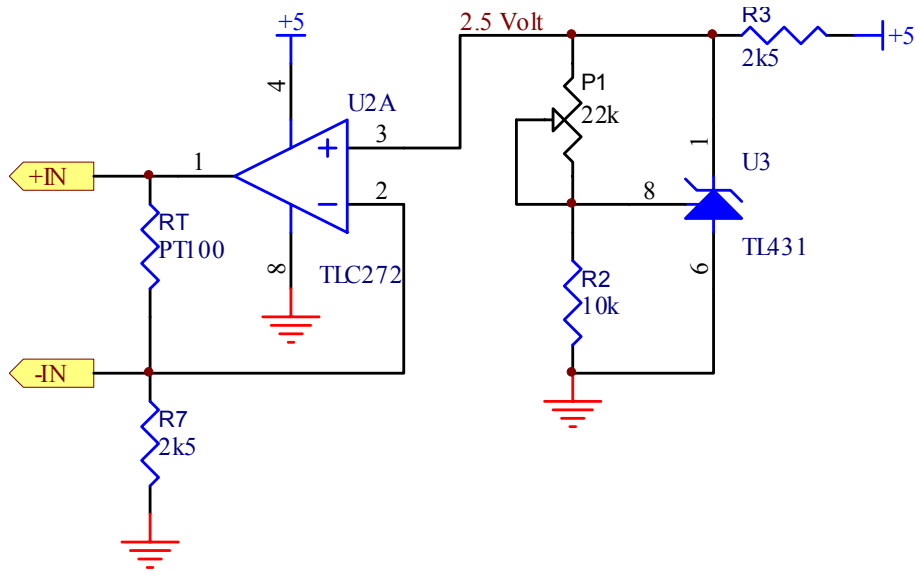
T	R	V	Çarpan	T	R	V	Çarpan
20	0,091513173	0,93765	21,32993	35,5	0,159267054	1,613842	21,9972
20,5	0,093764964	0,960122	21,35145	36	0,1613842	1,634972	22,01873
21	0,096012214	0,982549	21,37297	36,5	0,163497204	1,656061	22,04025
21,5	0,098254937	1,004931	21,39449	37	0,165606078	1,677108	22,06178
22	0,100493147	1,027269	21,41602	37,5	0,167710835	1,698115	22,08331
22,5	0,102726858	1,049561	21,43754	38	0,169811487	1,71908	22,10484
23	0,104956082	1,071808	21,45906	38,5	0,171908044	1,740005	22,12637
23,5	0,107180834	1,094011	21,48058	39	0,17400052	1,760889	22,1479
24	0,109401126	1,11617	21,50211	39,5	0,176088927	1,781733	22,16943
24,5	0,111616973	1,138284	21,52363	40	0,178173275	1,802536	22,19096
25	0,113828386	1,160354	21,54515	40,5	0,180253576	1,823298	22,21249
25,5	0,11603538	1,18238	21,56668	41	0,182329843	1,844021	22,23402
26	0,118237968	1,204362	21,5882	41,5	0,184402087	1,864703	22,25555
26,5	0,120436163	1,2263	21,60972	42	0,186470319	1,885346	22,27708
27	0,122629977	1,248194	21,63125	42,5	0,188534552	1,905948	22,29862
27,5	0,124819424	1,270045	21,65277	43	0,190594796	1,926511	22,32015
28	0,127004517	1,291853	21,6743	43,5	0,192651064	1,947034	22,34168
28,5	0,129185268	1,313617	21,69582	44	0,194703366	1,967517	22,36321
29	0,131361691	1,335338	21,71735	44,5	0,196751714	1,987961	22,38474
29,5	0,133533798	1,357016	21,73887	45	0,19879612	2,008366	22,40628
30	0,135701603	1,378651	21,7604	45,5	0,200836594	2,028731	22,42781
30,5	0,137865117	1,400244	21,78193	46	0,202873148	2,049058	22,44934
31	0,140024353	1,421793	21,80345	46,5	0,204905793	2,069345	22,47087
31,5	0,142179325	1,4433	21,82498	47	0,20693454	2,089594	22,49241
32	0,144330044	1,464765	21,8465	47,5	0,208959401	2,109804	22,51394
32,5	0,146476523	1,486188	21,86803	48	0,210980386	2,129975	22,53548
33	0,148618775	1,507568	21,88956	48,5	0,212997507	2,150108	22,55701
33,5	0,150756811	1,528906	21,91109	49	0,215010775	2,170202	22,57854
34	0,152890645	1,550203	21,93261	49,5	0,2170202	2,190258	22,60008
34,5	0,155020289	1,571458	21,95414	50	0,219025793	2,210276	22,62161
35	0,157145754	1,592671	21,97567				

Daha önce de açıklandığı gibi, Wheatstone köprüsünün doğrusal olmayan karakteristiğinden dolayı, sıcaklık değerlerinin hesaplanabilmesi

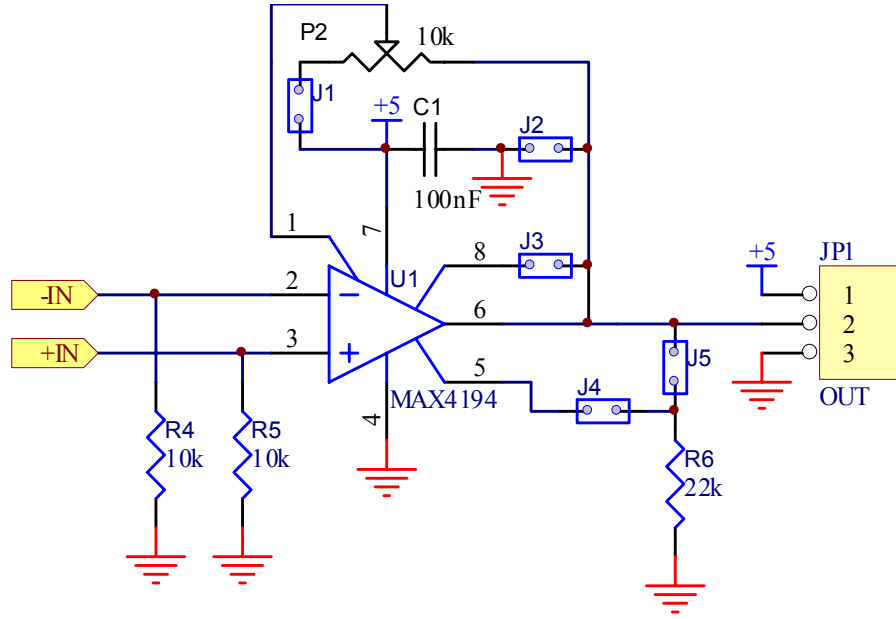
için 0.5°C 'lik aralıklarla gerilim çıkışları hesaplanarak elde edilen Tablo 3-7'deki sıcaklık çarpanları kullanılmıştır.

Sabit Akım Kaynağı ile Ölçme

Yukarıda anılan hesaplamaların zaman alması nedeniyle daha doğrusal bir çıkış veren bir devre kullanılması planlanmıştır. Bunun için sabit akım kaynağıyla beslenerek geniş bir direnç aralığında Pt-100 üzerindeki doğrusal gerilim değişimleri alınabilmesi amacıyla 4 telli direnç ölçme devresi kurulmasına karar verilmiştir. Şekil 3-32'de görüldüğü gibi, sabit akım kaynağı TLC272 işlemsel yükselteci ve 2.5V çıkış veren bir hassas gerilim referans elemanı (LM336) kullanılarak tasarlanmıştır. Pt-100 üzerindeki gerilim değişimini yükseltmek için MAX 4194 enstrümantasyon yükselteci kullanılarak Şekil 3-33'teki gibi bir devre tasarlanmıştır.



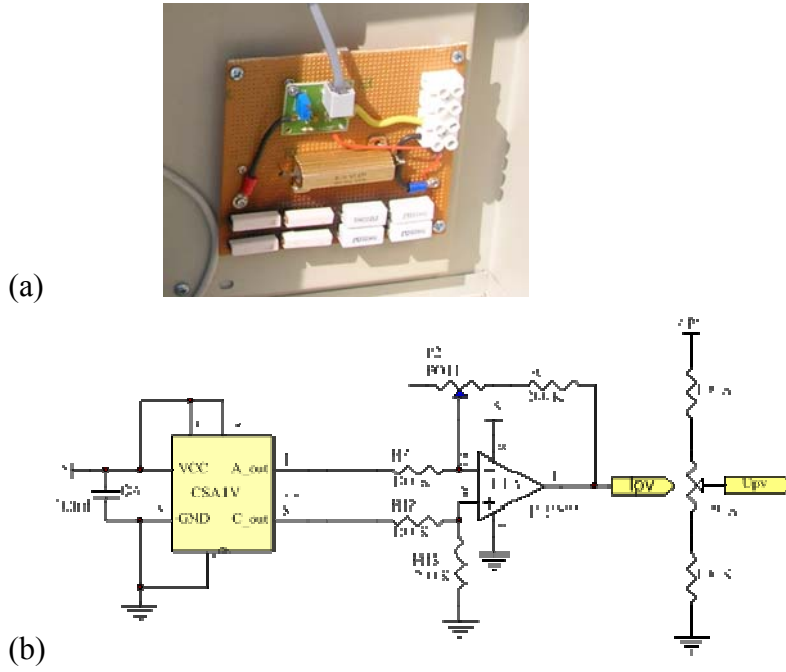
Şekil 3-32 Pt-100 ile sıcaklık ölçümünde kullanılacak sabit akım kaynağı devresi.



Şekil 3-33 Pt-100 üzerindeki gerilim değişimlerini enstrümantasyon yükselteci ile 0-5 V gerilim değerine yükselten devre.

Temmuz 2005'te PV/T sistem ölçüm sistemi yenilenmiş, hem sensörler hem de ölçüm değerlerini saklamakta kullanılan veri toplama ünitesi değiştirilmiştir.

PV/T sistemdeki güneş kollektörü giriş ve çıkış suyu sıcaklıkları ile depo suyu sıcaklıklarının ölçümünde kullanılan üç adet Pt-100 sıcaklık sensörü için doğrusallığı çok iyi olan ve yukarıda devre şemaları verilen ölçme devreleri kurulmuş ve sisteme bağlanmıştır. Güneş modülü yüzey sıcaklıklarının ölçümü için ise daha önce kullanılmakta olan iki adet LM35 sıcaklık sensörü kullanılmıştır. Ortam sıcaklığının ölçülmesi için de sisteme bir adet LM35 sıcaklık sensörü eklenmiştir. Akım sensörü (CSA-1V) satın alınarak güneş modülünün akımı ve gerilimi Şekil 3-34'teki devre aracılığıyla ölçülerek veri toplama ünitesine aktarılmıştır.



Şekil 3-34 (a) Akım ve gerilim ölçümünde kullanılan devre ve yük dirençleri, (b) devre şeması

3.7. Pompa Özellikleri

Sistem verimini etkileyen faktörlerden biri olan debinin etkisinin incelenebilmesi için doğal dolaşımın yanı sıra zorlanmış dolaşımli olarak çalıştırmak için sisteme pompa da eklenmiştir. Seçilen pompa CP 53, güneş kollektör sistemleri için kullanılır. Pompa için teknik veriler aşağıda verilmiştir. Pompa karakteristik eğrisi Şekil 3-35'te görülmektedir. Ayrıntılı bilgi Ek 3'tedir.

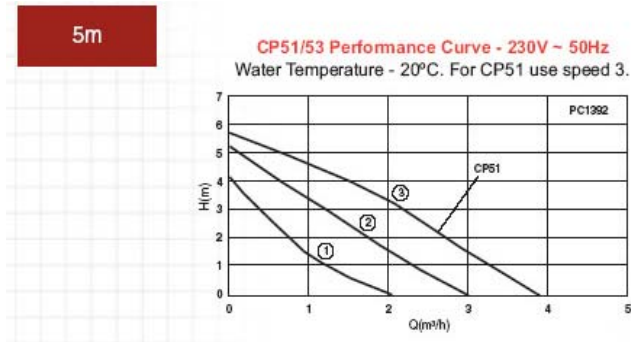
Teknik Değerler

- Maksimum statik basınç: 10 Bar
- Maksimum çalışma sıcaklığı: 110°C

- Önerilen minimum debi: 5 lt/dak

Tablo 3-8 CP 53 pompasının elektriksel özellikleri

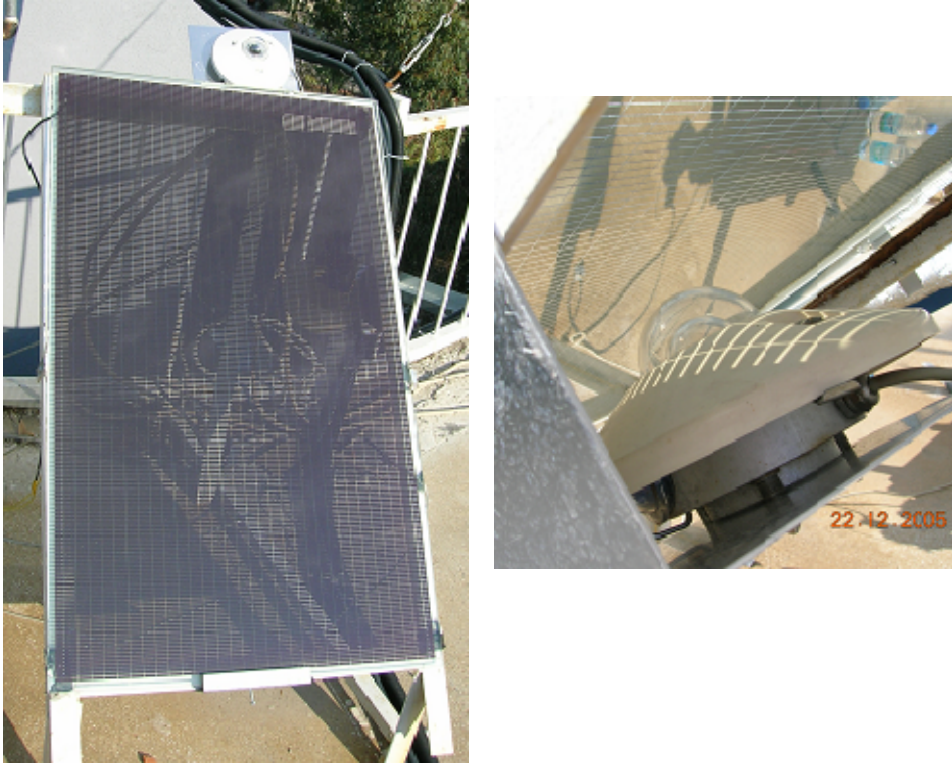
Hız kademesi	Devir hızı (rpm)	Çekilen güç (W)	Akım (A)
1	950	56	0.26
2	1400	78	0.35
3	1850	104	0.45



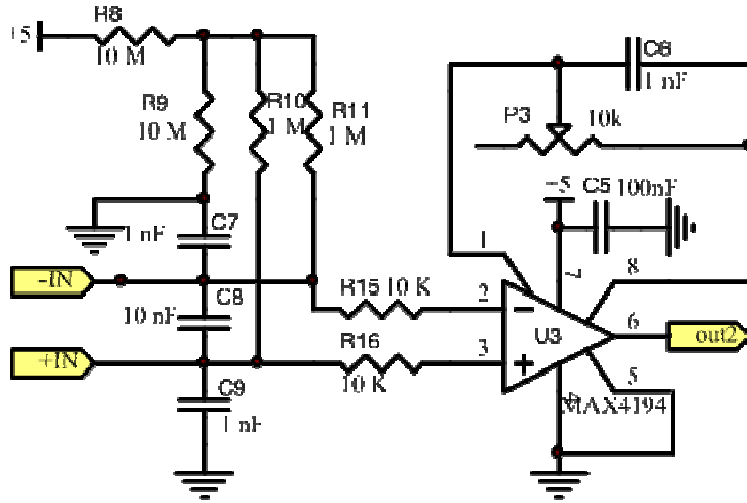
Şekil 3-35 Circulating Pumps CP 53 Pompa karakteristiği (Su sıcaklığı @20°C)

3.8. Güneş Modülü ve Camın Geçirgenliklerinin Ölçümünde Kullanılan Düzenek

Güneş modülünün ve camın geçirgenliklerinin deneysel olarak belirlenebilmesi için Şekil 3-36'da görülen düzenek kurulmuş ve iki adet pironometreden biri güneş modülü ile aynı düzlemde gelen güneş ışınımını ve diğeri modülün altına yerleştirilerek güneş ışınımının geçen kısmını ölçmüştür. Pironometrelerin çıkışındaki düşük değerli gerilim değişimlerinin yükseltilmesi için Şekil 3-37'de görülen devre kurulmuş ve veri toplama ünitesine bağlanmıştır.



Şekil 3-36 Güneş modülü geçirgenliğinin ölçümünde kullanılan düzenek



Şekil 3-37 Pironometrelerin çıkışındaki düşük değerli gerilim değişimlerinin yükseltilmesi için kullanılan yükselteç devresi

4. BULGULAR

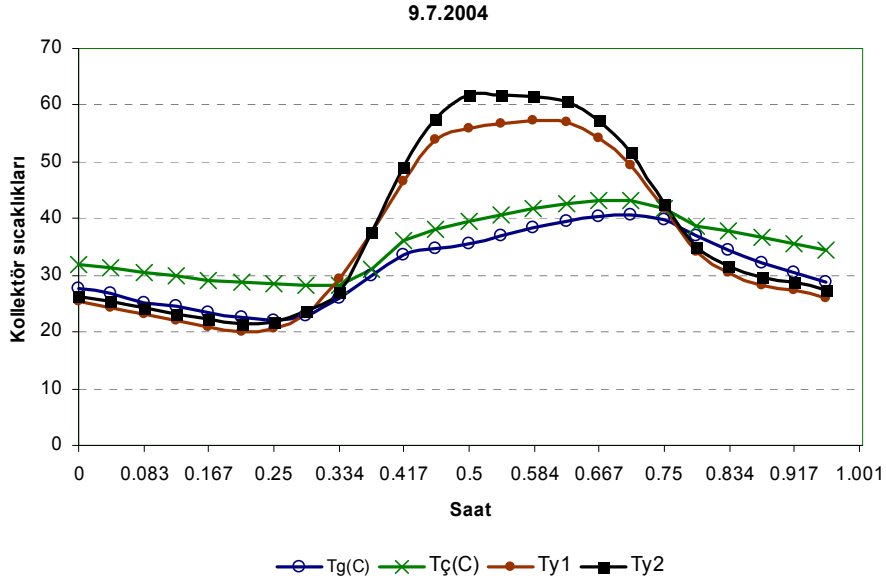
Deneylerin ilk aşamasında PV modül ile yutucu yüzey arasında 2 cm'lik hava boşluğu bırakılarak sistem verimi incelenmiş, giriş ve çıkış suyu sıcaklıkları arasında 5-6°C'lik bir fark gözlemlenmiştir. Bunun nedeni toplayıcılarda kullanılan cam örtü yerine %10 geçirgenliği olan güneş modülünün örtü malzemesi olarak kullanılması, dolayısıyla gelen güneş ışınımının çoğunun modül tarafından soğurularak elektrik enerjisine dönüştürülmesidir.

Elektriksel verim ve sıcaklığın elektriksel verim üzerine etkileri incelenmiştir. Bergene ve Lovvik (1995) tarafından yapılan modelleme ve Hottel-Whillier düzlemsel toplayıcı modelinden (Duffie ve Beckman, 1991) yararlanılarak termal sistem için matematik modelleme yapılmıştır. Kurulan sistemdeki deneysel sonuçlar ile modelde hesaplanan değerler karşılaştırılmıştır.

Tablo 4-1'de örnek bir günde alınan kollektör giriş (T_g) ve çıkış ($T_ç$) suyu sıcaklıkları ile güneş pili hücre sıcaklıklarının (T_{y1} ve T_{y2}) saatlik ortalamaları verilmiştir. Şekil 4-1'de bu sıcaklık değişimleri çizdirilmiştir.

Tablo 4-1 9.7.2004 günü alınan kollektör giriş ve çıkış suyu sıcaklıkları ile güneş pili hücre sıcaklıklarının saatlik ortalamaları.

T_{y1} (°C)	T_{y2} (°C)	T_g (°C)	$T_ç$ (°C)	$T_ç - T_g$ (°C)	Saat	Gün
25,27	26,39	27,80	31,88	4,08	00:00	09.07.2004
24,17	25,31	26,83	31,22	4,39	01:00	09.07.2004
23,05	24,23	25,25	30,55	5,31	02:00	09.07.2004
21,88	23,18	24,43	29,84	5,41	03:00	09.07.2004
20,88	22,20	23,54	29,15	5,61	04:00	09.07.2004
20,18	21,51	22,66	28,81	6,15	05:00	09.07.2004
20,60	21,83	22,10	28,39	6,29	06:00	09.07.2004
23,05	23,73	22,87	28,19	5,32	07:00	09.07.2004
29,45	27,03	26,00	28,28	2,28	08:00	09.07.2004
37,62	37,55	29,86	31,04	1,17	09:00	09.07.2004
46,50	49,22	33,63	36,05	2,43	10:00	09.07.2004
54,05	57,48	34,68	37,99	3,32	11:00	09.07.2004
55,94	61,81	35,67	39,43	3,76	12:00	09.07.2004
56,84	61,77	36,99	40,56	3,57	13:00	09.07.2004
57,23	61,63	38,25	41,67	3,41	14:00	09.07.2004
57,01	60,64	39,38	42,68	3,30	15:00	09.07.2004
54,18	57,42	40,33	43,24	2,90	16:00	09.07.2004
49,26	51,55	40,70	43,12	2,43	17:00	09.07.2004
41,85	42,57	39,81	41,75	1,94	18:00	09.07.2004
34,19	34,94	37,02	38,58	1,56	19:00	09.07.2004
30,38	31,48	34,48	37,80	3,32	20:00	09.07.2004
28,17	29,64	32,07	36,78	4,71	21:00	09.07.2004
27,32	28,66	30,61	35,56	4,95	22:00	09.07.2004
25,93	27,48	28,85	34,40	5,55	23:00	09.07.2004



Şekil 4-1 9.7.2004 günü için kollektör giriş (T_g) ve çıkış suyu ($T_ç$) sıcaklıkları ile yüzey sıcaklıklarının (T_{y1}, T_{y2}) gün içindeki değişimi.

Seçilen örnek günde güneş ışınımlarında kesiklikler olmasından dolayı saatlik ortalamalarda ani sıçramalar gözlenmektedir. Dolayısıyla verim hesabı daha sonra alınan ölçümler kullanılarak yapılmıştır.

İlk alınan ölçümler sırasında akım sensörü satın alınmamış olduğundan güneş pili elektriksel verimi elde edilememiştir. İlerleyen aşamalarda Eş.(4-1) kullanılarak güneş pili elektriksel verimi hesaplanmıştır.

$$\eta_0 = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{G \cdot A_{PV}} \quad (4-1)$$

Sıcaklığın bir işlevi olarak elektriksel verim Eş.(4-2)'deki gibi tanımlanmıştır (Duffie ve Beckman, 1991). Bu eşitlikte silisyum verimi için

verilen $-0.45^{\circ}\text{C}^{-1}$ değerindeki g sıcaklık katsayısı yerine amorf silisyum için üretici firma tarafından verilen $-0.2^{\circ}\text{C}^{-1}$ değeri kullanılmıştır. Bu eşitlik ve ölçülen yüzey sıcaklık değerleri kullanılarak elektriksel verimin sıcaklıkla değişimi analiz edilmiştir. Burada η_0 Eş. (4-1)'den elde edilen standart test koşullarındaki (STC) verimdir.

$$\eta_e = \eta_0 (1 - 0.002[T_{h\ddot{u}cre} - 25^{\circ}\text{C}]) \quad (4-2)$$

PV/T sistemlerle ilgili yapılan diğer çalışmalarda olduğu gibi, PV modül ile yutucu yüzey yapıştırılarak ısıl temas sağlanması dşnlmş, ancak zaten modülün g çıkışının sıcaklığa bağımlılığının düşük ($T_K = -0.2$) olmasından dolayı bu yolla sıcaklığının düşürülmesinin sistem verimine önemli bir katkı sağlamayacağı gözönünde bulundurularak bu çalışmadan vazgeçilmiştir. Ayrıca, güneş modülünün yutucu yüzeyle temasında zorlanmış taşınımın etkisiyle toplayıcı yüzeyinin sıcaklığı ve dolayısıyla sistem verimi düşecektir. Bu yapıda cam örtü kullanılması zorlanmış taşınımın etkisini yutucu yüzeyden uzaklaştıracak, ancak ek yansımalarından dolayı toplayıcı yüzeyine gelen güneş işinimi miktarını, dolayısıyla verimi azaltacaktır.

Ölçülen değerlerin değerlendirilebilmesi için Güneş Enerjisi Enstitüsü Binasında ölçülmekte olan güneş ışınımı, rüzgâr hızı değerleri alınmıştır. Yatay düzlemdeki güneş ışınımını ölçmekte olan bu sistemden alınan verilerin eğimi İzmir'in enlemine ($\beta = \Phi = 38.46^\circ$) eşit güneye bakan ($\gamma = 0^\circ$) PV/T sistemine uyarlanabilmesi için gerekli olan hesaplamalar saat açıları (ω) ve deklinasyon açıları (δ) belirli bir gün için hesaplanarak

$$\cos \theta = \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (4-3)$$

ve

$$I_\beta^* = I_s^* \cos \theta \quad (4-4)$$

eşitlikleri kullanılarak yapılmıştır (Atagündüz, G., 1989). Microsoft Excel programı kullanılarak yazılan bu eşitliklerle gün değeri n değiştirilerek tüm günler için eğik düzleme geliş açıları ve güneş ışınimleri hesaplanmıştır.

Termal sistemin veriminin hesaplanmasında kullanılan

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m} C_p (T_{out} - T_{in})}{G \cdot A_{PV}} \quad (4-5)$$

eşitliğinde kollektör giriş ve çıkış suyu sıcaklığı ölçülmekte olup eğik düzleme gelen güneş ışınımı da hesaplanmıştır. Suyun değişik sıcaklıklardaki özgül ısı Prof. Dr. Gürbüz Atagündüz'ün Isı Transferi kitabındaki tablodan elde edilmiştir. Kollektör alanı güneş modülü alanına eşit ve 0.6m^2 'dir. Burada bilinmeyen \dot{m} , kollektör borularından geçen suyun debisidir. Sistem doğal dolaşımlıdır ve düşük değerdeki bu debi sıcaklık farkına bağlı olarak değişmektedir. Debinin ölçülmesi için bir

akışölçer satın alınamamış olmasından dolayı bu değerin sıcaklık farklarından yararlanılarak hesaplanması gerekmiştir. D.E.Ü. Makina Mühendisliği Bölümü, Enerji A.B.D.’nda tamamlanan “kapalı termosifon sisteminin akış ve ısı transferi” konulu doktora tezinden yararlanılarak Eş.(4-6)’daki ortalama akış hızı eşitliği kullanılmış ve debi hesaplanmıştır (Başaran, T., Kapalı Termosifon Döngüsünde Akış ve Isı Transferinin Teorik ve Deneysel İncelenmesi, 2002).

$$v_m = (g\beta QH/8\mu L \pi C_p)^{1/2} \quad (4-6)$$

Burada

v_m : kapalı döngüdeki ortalama akış hızı (m/s)

β : ısı genleşme katsayısı (/K)

g : standart yerçekimi ivmesi (m/s²)

Q : akışkana aktarılan ısı (W)

H : akış yüksekliği (m)

μ : dinamik viskozite (kg/ms)

L : akış yolu uzunluğu (m)

C_p : özgül ısı (kJ/kgK)

Kollektör borularındaki suya aktarılan yararlı ısı

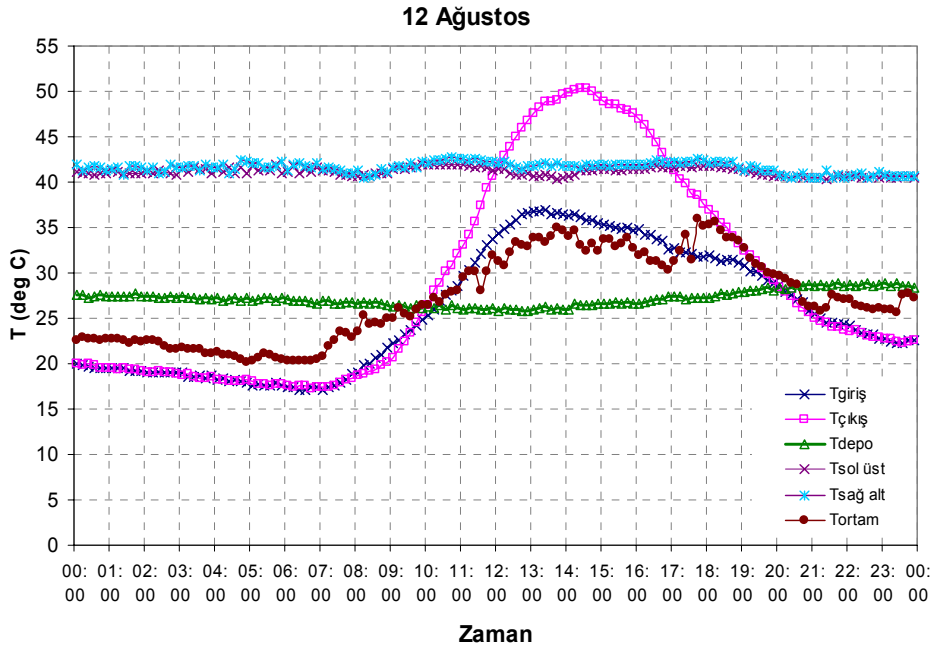
$$Q_u = \dot{m} C_p (T_{\zeta} - T_g)$$

eşitliğinden elde edilerek hız eşitliğinde yerine konulur. Ancak yararlı ısı eşitliğindeki kütleli debi terimi

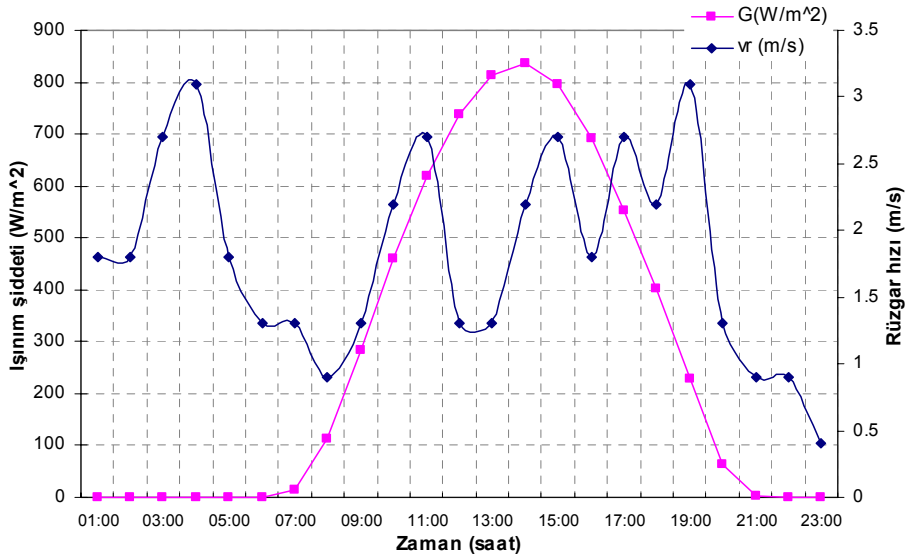
$$\dot{m} = \rho \cdot V_m \cdot A_{boru} \quad (4-8)$$

bilinmeyen hız terimini içermektedir. Eşitliğin her iki tarafında bilinmeyen akış hızı değerini çözebilmek için iterasyon yapılır. Ortalama akış hızı için bir değer tahminlenir. Bu değer eşitlikte yerine konularak bir sonraki değer hesaplanır. Ortalama akış hızı bir değere yakınsayana kadar iterasyon devam ettirilir.

PV/T hibrid sistemin ölçümlerinin alındığı örnek bir günün verileri ve parametrelerin zamana göre değişimleri incelenmiştir. 12 Ağustos 2005 günü için alınan verilerden elde edilen kollektör giriş ve çıkış suyu ile depo suyu, güneş modülünün ölçülen yüzey sıcaklıklarının ve ortam sıcaklıklarının zamana göre sıcaklık değişimleri Şekil 4-2'de gösterilmiştir. Buradan görüldüğü gibi kollektör çıkış suyu sıcaklığı 50°C'yi biraz aşmaktadır. Giriş ve çıkış suyu sıcaklıkları arasında da 14°C'yi aşan sıcaklık farkı oluşmaktadır. Depo suyu sıcaklığı 28°C'yi aşmakta ve gece boyunca da bu değerini korumaktadır. Ancak sabaha karşı yaklaşık 24°C'ye düşmekle beraber gün içinde yeniden yükselmektedir. Denemeler sırasında hemen her gün 10 ile 25 lt arasında bir su miktarı depodan boşaltılmıştır. Bunun nedeni giriş suyu sıcaklığının sürekli artmasını engellemek, aynı zamanda da sistemden ısı enerjisi çekme suretiyle yeteri kadar sıcaklık farkı yaratarak doğal dolaşımli sistemin işlemesine yardımcı olmaktır. Aynı grafikten güneş modülünün çapraz iki köşesinden ölçülen yüzey sıcaklıklarının gün boyunca hemen hemen hiç değişmediği gözlenmektedir. Bunun nedeni zorlanmış taşınım ile ısı kaybının çok düşük olmasıdır. Şekil 4-3'teki grafikte görüldüğü gibi, G.E.E. Meteoroloji istasyonu ölçümlerine göre rüzgar hızı en fazla 3.1 m/s'ye çıkmış olmasına rağmen gün boyunca 1.5 m/s'nin altında kalmıştır.



Şekil 4-2 12 Ağustos 2005 günü ölçülen kolektör giriş ve çıkış suyu, depo suyu, güneş modülünün ölçülen yüzey sıcaklıklarının ve ortam sıcaklıklarının zamana göre değişimi

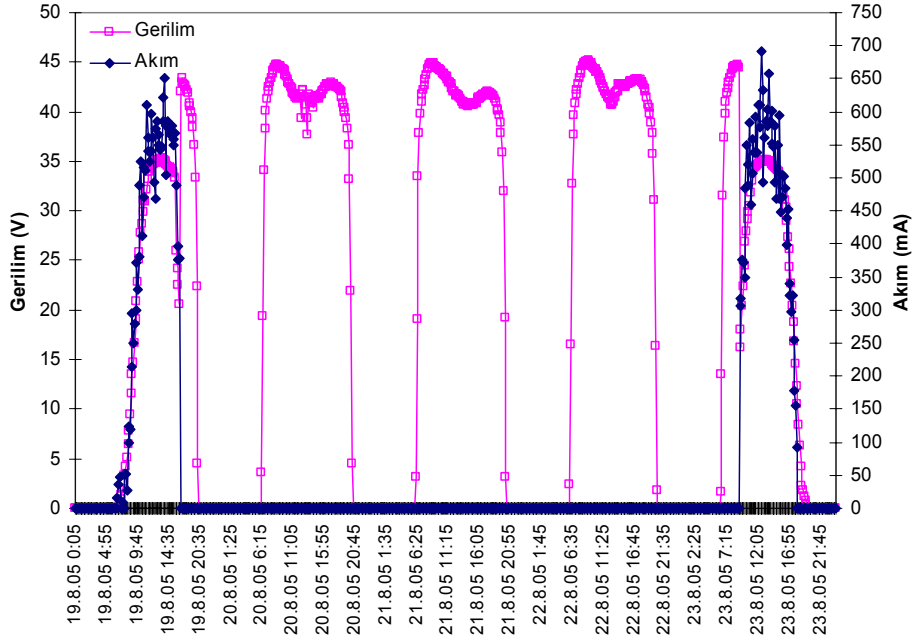


Şekil 4-3 12 Ağustos 2005 günü gelen güneş ışınımı ve rüzgâr hızının gün içindeki değişimi

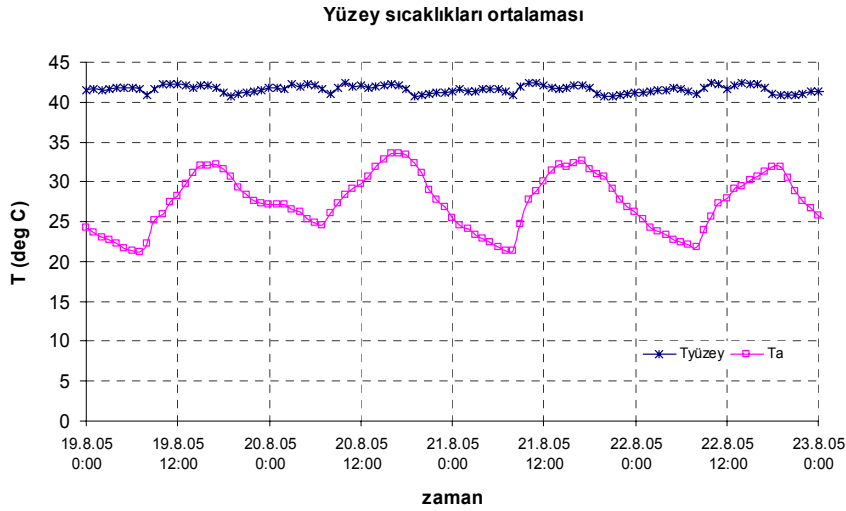
İncelenen bu örnek günde akım, maksimum güç noktası için hesaplanan direnç olan 48Ω 'a en yakın şekilde ayarlanmış seri-paralel bağlı taş dirençler üzerinden akmaktadır. Güneş modülünde elektrik üretimi vardır ve modülden güç çekilmektedir. Daha sonra modülden güç çekilmediği durum için inceleme yapmak üzere yük çıkarılmış ve etkisi incelenmiştir. Dolayısıyla yükün çıkarılıp tekrar takıldığı bir zaman aralığındaki grafikleri incelemekte yarar vardır.

Şekil 4-4'teki grafikte güneş modülü akım ve geriliminin zamana karşı değişimi görülmektedir. İncelenen bu zaman aralığında 19.08.2005 günü 17:35'te yük çıkarılmış ve güneş pili modülü gerilimi açık devre gerilim değerine yükselmiştir ($V_{oc}=49V@STC$). Yük çıkarıldığı için akım sıfırlanmıştır. 23.08.2005 günü 09:15'te yük tekrar takılmış ve güneş modülünden akım çekilmesiyle beraber gerilim gün içinde güneş ışınımının artmasıyla 36-37V mertebesine kadar yükselmiştir. Yükün çıkarıldığı zaman diliminde modülün açık devre gerilimindeki düşüş modülün hücre sıcaklığındaki artıştan kaynaklanmaktadır.

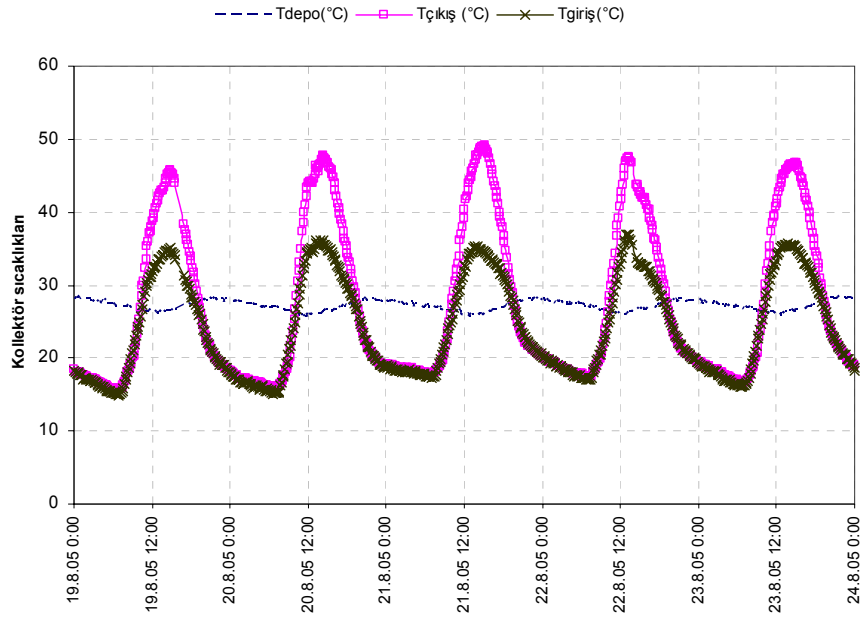
Şekil 4-5'teki grafikte güneş modülünün yüklü ve yüksüz durumlarda yüzey sıcaklığı ortalaması ile birlikte PV/T sistemin bulunduğu yerdeki ölçülen ortam sıcaklığı saatlik ortalamasının zamana karşı değişimi görülmektedir. İncelenen bu zaman aralığında yükün çıkarılmasıyla yüzey sıcaklıklarının değişimi arasında belirgin bir değişim gözlenmemiştir. Şekil 4-6'da ise kollektör giriş ve çıkış suyu ile depo suyu sıcaklıklarının zamana göre değişimleri çizdirilmiştir. Şekil 4-7'de yatay düzleme gelen güneş ışınımı değerleri görülmektedir.



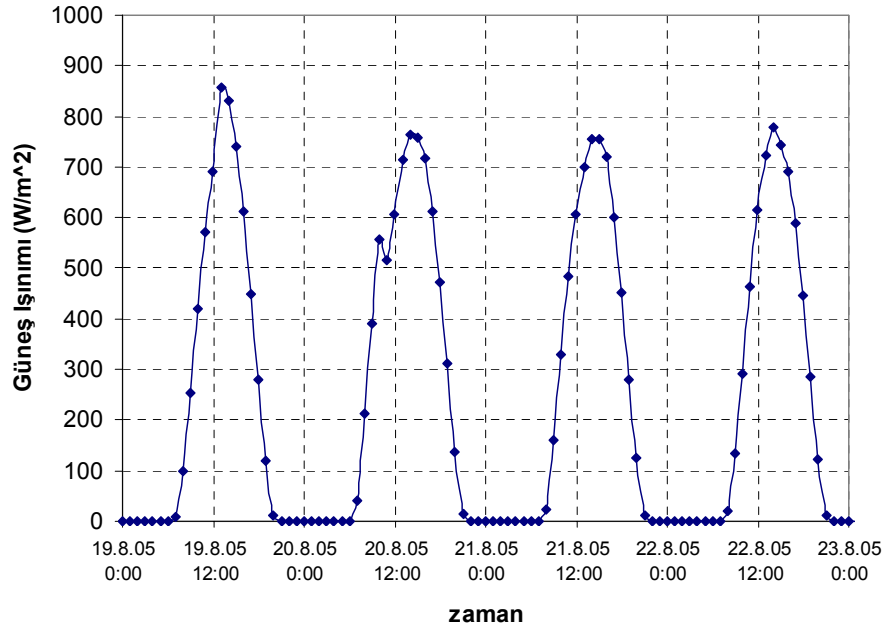
Şekil 4-4 PV/T sistemde güneş modülünün yüklü ve yüksüz durumlarda akım ve geriliminin zamana göre değişimi.



Şekil 4-5 PV/T sistemde güneş modülünün yüklü ve yüksüz durumlarda yüzey sıcaklığı ortalaması ile ortam sıcaklığının zamana göre değişimi.



Şekil 4-6 PV/T sistemde güneş modülünün yüklü ve yüksüz durumlarında kolektör sıcaklıklarının zamana göre değişimi



Şekil 4-7 Güneş ışınımının zamana göre değişimi

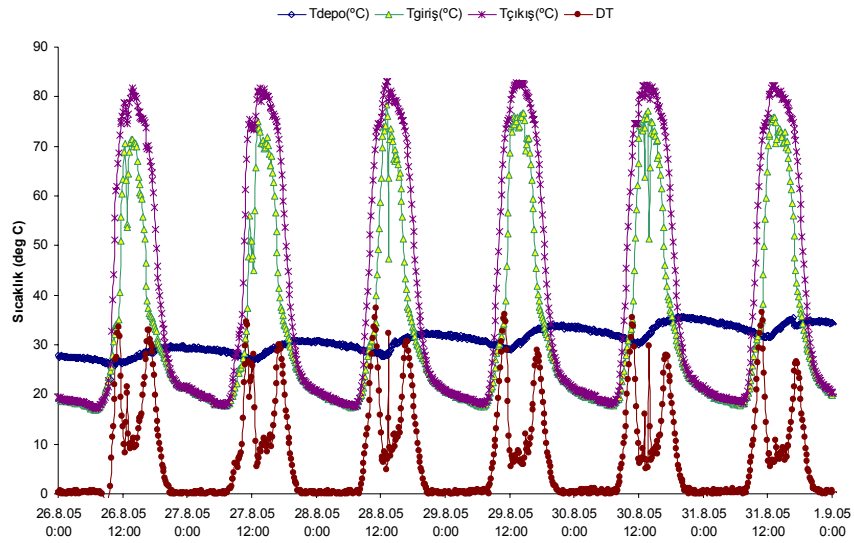
PV/T hibrid sistemin birlikte kullanılmasının yanı sıra karşılaştırma yapabilmek amacıyla ayırık güneş modülü ve termal sistem olarak da çalıştırılmıştır. 10mm kalınlığındaki güneş modülü çıkarılıp kollektörün yanına kollektörle aynı eğimde yerleştirilip güneş modülü akımı, gerilimi ve camının alt ve üst sıcaklıkları ölçülmüştür. Termal sistemin örtüsü olarak yine güneş modülüyle aynı kalınlıkta 10mm'lik bir cam takılmıştır.

26 Ağustos 2005 günü saat 9:45'te değiştirilen sistem için alınan verilerin değerlendirilmesi yapılmıştır. Şekil 4-8'de ayırık çalışan güneş modülü ve termal sistem, Şekil 4-9'da termal sistemin giriş ve çıkış suyu ile depo suyu sıcaklıklarının zamana göre değişimleri görülmektedir. Daha önce incelenen günlere göre çıkış suyu sıcaklığındaki artışın 30°C kadar olduğu gözlemlenmektedir. Bu da daha önce güneş modülünün toplayıcı yüzeyini %90 oranında gölgelemesinden kaynaklanmıştır.

Depo suyu sıcaklığı incelendiğinde incelenen gün içinde 30°C'ye kadar çıktığı ve gece boyunca çok az kayıpla sıcaklığını koruduğu görülmektedir. Sıcak suyla soğuk su tek bir depoda karışması ve günlük yaklaşık 20lt'lik bir suyun kullanılması sonucu depo sıcaklığı fazla yükselmemiştir. Seçilen depo kapasitesi standart depo kapasitesi seçimi olan 75 lt/m² değerinden büyük seçildiğinden depoya ısı transferi yavaş olmuştur.

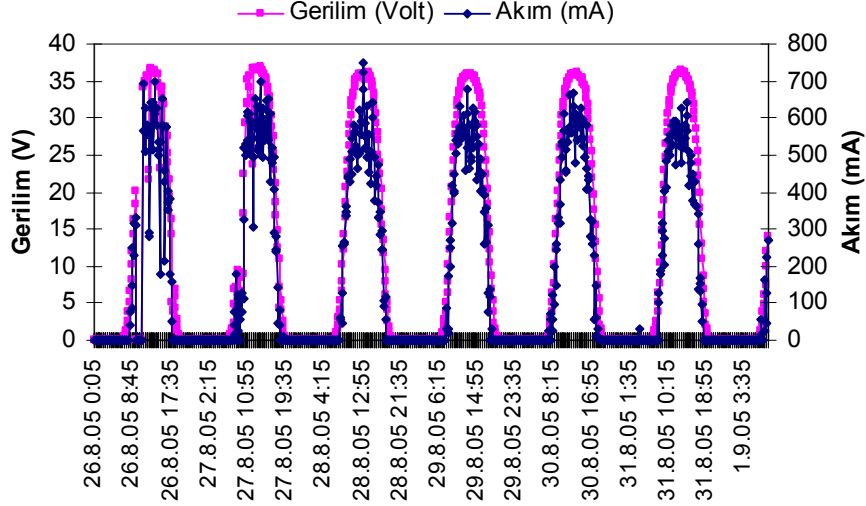


Şekil 4-8 Güneş modülü ve termal toplayıcının ayrı çalıştırılması



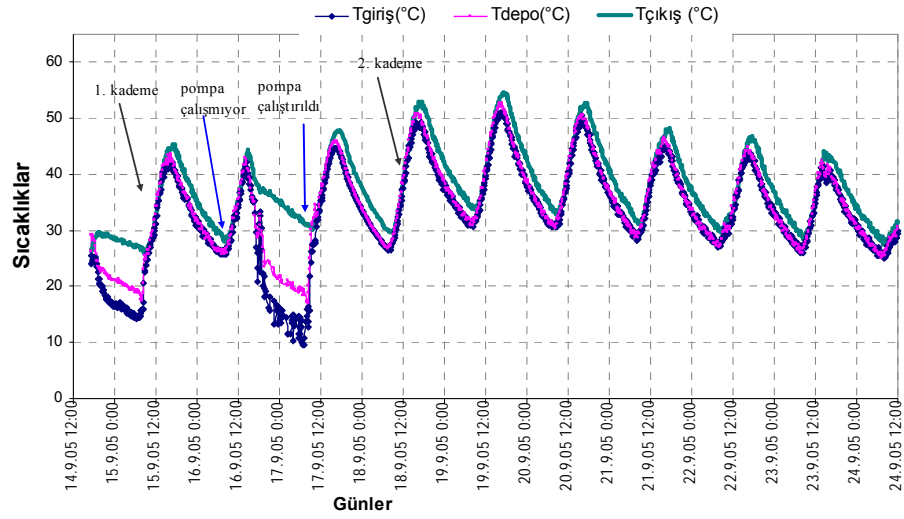
Şekil 4-9 Termal toplayıcının giriş ve çıkış suyu ile depo suyu sıcaklıklarının zamana göre değişimleri

Güneş modülünün tek başına çalışması da incelenmiş ve Şekil 4-10'da görülen akım ve gerilimin zamana göre değişim eğrisi çıkarılmıştır.



Şekil 4-10 Ayrıntılı çalışan güneş modülünün akım ve geriliminin zamana göre değişimleri

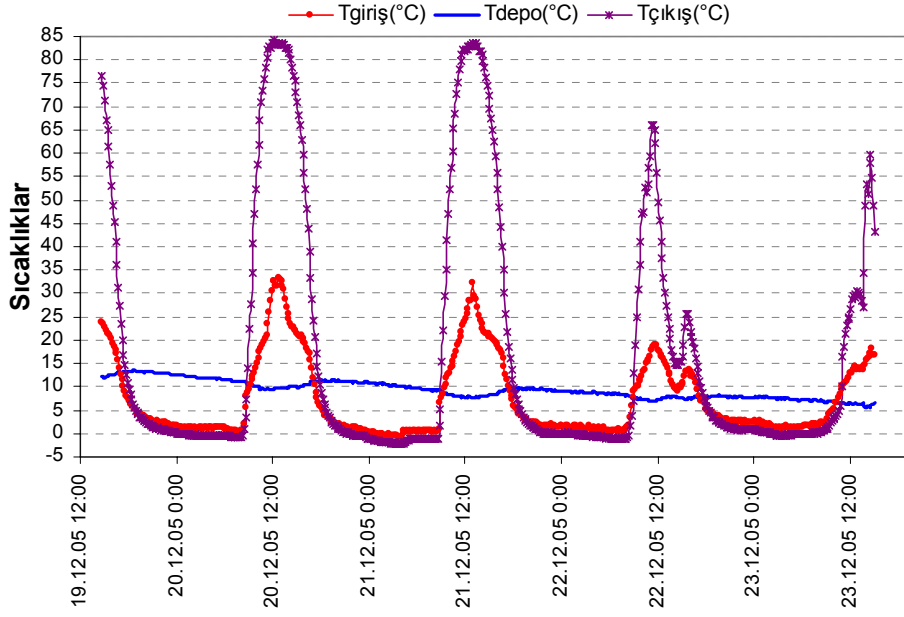
Sistem verimini etkileyen faktörlerden biri olan debinin etkisinin incelenebilmesi için güneş kollektör sistemleri için kullanılan üç devirli bir pompa eklenmiştir. Pompanın 1. ve 2. devir hızlarında çalıştırılması sonucu sıcaklık değişimleri Şekil 4-11'dedir. Şekilden de görüldüğü gibi pompanın 1. kademedede 950 dev/dak hızda çalıştırılması sonucu depoya ısı transferi gerçekleşmiş ve depo suyu sıcaklığı çıkış suyu sıcaklığına ulaşmıştır. Pompa 2. kademedede 1400 dev/dak'da çalıştırıldığında da kapalı sistemde dolaşan suyun ısını depoya aktararak depo suyu sıcaklığını artırdığı görülmektedir. 16.09.2005 saat 16:45'te pompanın durdurulup 17.09.05 10:40'te yeniden çalıştırılmasına kadar geçen sürede ise giriş ve depo suyu sıcaklıklarında belirgin bir düşüş olmuştur.



Şekil 4-11 Ayırık sistemde farklı devir hızlarında çalışan pompanın kolektör ve depo suyu sıcaklıklarına etkisi

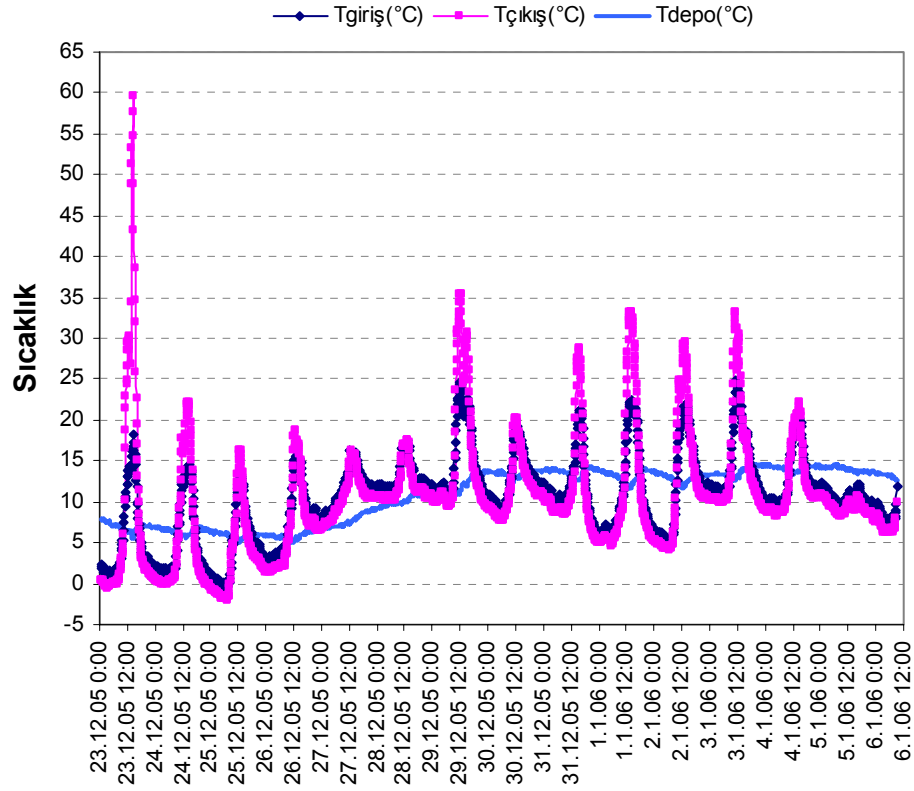
Güneş modülünün yüzeyine gelen güneş ışınımı ve altına geçen miktarı ölçülerek geçirme oranı τ 'nın belirlenmesi için kullanılan iki adet pironometreden alınan düşük değerdeki gerilimin yükseltilecek veri toplama ünitesine aktarılması için gerekli devrenin tasarımı yapılmış ve 19.12.2005'te montajı yapılarak bu parametrenin ölçümü yapılmıştır. Alınan ölçüm sonuçlarına göre güneş modülünün geçirgenliği %10 olarak belirlenmiştir.

Bu ölçümlerin yapıldığı zaman aralığında kolektör suyu sıcaklıkları da veri toplama ünitesine aktarılmış ve Şekil 4-12'de görüldüğü gibi, doğal dolaşimli olarak çalışan sistemde çıkış suyu sıcaklığı depoya aktarılamamıştır.



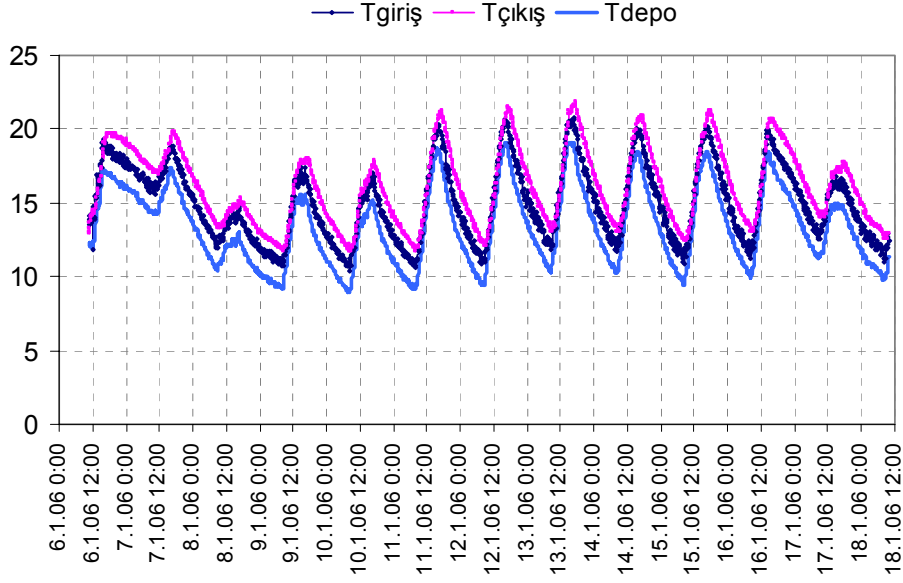
Şekil 4-12 19–23.12.2005 tarihleri arasında doğal dolaşimli olarak çalışan güneş kolektörü su sıcaklıkları

23.12.2005 günü saat 16:15'te yeniden güneş modülü takılarak doğal dolaşimli olarak çalıştırılan PV/T sisteme ait ölçülen kolektör suyu sıcaklıkları Şekil 4-13'te görülmektedir. Kolektör cam örtüsü olarak %10 geçirgenliği olan güneş modülünün takılmasıyla çıkış suyu sıcaklığında belirgin bir düşme gözlenmiştir. Kolektörden çıkarılan camın geçirgenliğinin ölçülmesi için daha önceki pironetreler ve ölçüm devresi kullanılmıştır. Alınan ölçüm sonuçlarına göre camın geçirgenliği % 72 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4-13 Güneş modülü ile beraber çalışan, doğal dolaşimli PV/T sisteme ait kolektör suyu sıcaklıkları

06.01.2006 günü saat 10:25'te PV/T sisteme pompa eklenerek 1. kademede çalıştırılmıştır. Şekil 4-14'teki grafikten görüldüğü gibi kolektör giriş, çıkış ve depo suyu sıcaklıkları birbirini izlemektedir. Buradan da depoya ısı transferinin gerçekleştiği anlaşılmaktadır.



Şekil 4-14 Zorlanmış dolaşımli PV/T sisteme ait kolektör suyu sıcaklıkları

4.1. Verimin Hesaplanması

26.08.2005 gününde saat 9:45'te güneş modülü çıkarılarak 10mm'lik bir cam takılmış ve termal sistem ve güneş modülü ayrı çalıştırılarak incelenmiştir. 29.08.2005 gününde saat 14:00-15:00 arası yalnızca termal sistem için ölçülen aşağıdaki değerler için akış hızı hesaplanmıştır. Hız terimi için başlangıç değeri olarak 0.1 m/s seçilmiş ve 16 iterasyon sonucu hızın değeri 0.0896 m/s'ye yakınsamıştır. Bu hız terimi Eş. 4-8'de yerine konulduğunda kütleli debi \dot{m} 0.01 kg/s olur.

Gün/saat	T _{giriş} (°C)	T _{depo} (°C)	T _{çıkış} (°C)	ΔT
29.8.05 14:00-15:00	76.09	29.03	86.01	9.92

Alınan ölçümler MATLAB'de yazılan ve verimi hesaplayan program (Ek 2) kullanılarak değerlendirildiğinde doğal dolaşimli olarak çalışan termal sistemin anlık verimi %41 olarak bulunmuştur.

Program işletildiğinde aşağıdaki değerler hesaplanmıştır:

$$h_r = 12.5400$$

$$toa = 0.6698$$

$$S = 476.4764$$

$$U_t = 3.3590$$

$$Q_u = 175.0600$$

$$F = 0.4888$$

$$F^1 = 0.7080$$

$$F_R = 0.6961$$

$$eta = 0.4101$$

Pompanın çalıştırıldığı 15.09.2005 günü saat 13:00-14:00 arası alınan değerler kullanılarak çalıştırılan program aşağıdaki değerleri vermiştir. Debinin artması verimi de artırmıştır ($\% \eta_{th} = \%59.5$).

Gün/saat	T _{giriş} (°C)	T _{depo} (°C)	T _{çıkış} (°C)	ΔT
15.9.05 13:00-14:00	40.82	41.73	42.52	1.7

$$m_f = 0.2789$$

$$toa = 0.6698$$

$$S = 449.2300$$

$$U_t = 2.6159$$

$$Q_u = 239.5593$$

$$F = 0.5413$$

$$F^1 = 0.7990$$

$$F_R = 0.7987$$

$$Q_{u1} = 203.8499$$

$$\eta = 0.5953$$

15.09.2005 saat 13:00-14:00 arası için alınan saatlik ortalama değerlere göre deneysel sonuçlardan elde edilen verim ise %52 olmuştur.

Saat	T _{giriş}	T _{çıkış}	T _ç - T _g	T _a	mC _p ΔT	η _{ih}	(T _g - T _a)/G	Işınım (β)
13:00	38.10	38.28	0.18	29	209.77	0.52	0.01356	670.7

İncelenen günlerde tek başına çalışan güneş modülünün ölçülen gerilim, akım ve yüzey sıcaklıkları kullanılarak anlık verimi Eş.(4-1) ve (4.2)'den hesaplanır.

Tarih	Gerilim (V)	Akım (mA)	T _{y1} (°C)	T _{y2} (°C)	T _a (°C)	G(β)
29.8.05 14:00	35.68	519.71	41.57	42.19	33.29	711.4

$$\eta_0 = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{G \cdot A_{PV}} = \frac{35.68V \times 519.71mA}{711.37W / m^2 \times 0.6m^2} = 0.0435$$

$$\eta_e = \eta_0 (1 - 0.002[T_{hücre} - 25^\circ C])$$

$$= 0.0435(1 - 0.002[41.88 - 25]) = 0.042$$

Tarih	Gerilim (V)	Akım (mA)	T _{y1} (°C)	T _{y2} (°C)	T _a (°C)	G(β)
15.9.05 13:00	35.80	639.88	41.30	42.19	29.82	693.3

$$\eta_0 = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{G \cdot A_{PV}} = \frac{35.80V \times 639.88mA}{693.31W / m^2 \times 0.6m^2} = 0.055$$

$$\eta_e = \eta_0 (1 - 0.002[T_{hücre} - 25^\circ C])$$

$$= 0.055(1 - 0.002[41.75 - 25]) = 0.053$$

15.09.2005 tarihinde alınan güneş ışınımı saatlik ortalama olduğu için anlık verim hesaplaması yanıltıcı olmuştur.

Güneş modülünün termal sistemle yeniden birleştirilerek doğal dolaşımı olarak çalıştırıldığı 25.12.2005 tarihinde sistemden alınan veriler ile meteorolojik veriler kullanılarak kütleli debi yeniden hesaplanmıştır. Saat 12:00-13:00 arasında ölçülen sıcaklık farkından yararlanılarak akışkan hızı için 18 iterasyon yapılmış ve 12. iterasyondan itibaren debi 0.000122kg/s'ye yakınsamıştır. Hesaplanan debi değeri yerine konularak ve sıcaklık farkları da kullanılarak PV/T hibrid sistemin anlık verimi %1.1 olarak hesaplanmıştır (Tablo 4-2). 30.12.2005 saat 12:00-13:00 arası ölçülen değerler kullanılarak hesaplanan ısı verim %9 olmuştur.

Tablo 4-2 25.12.2005 tarihinde sistemden alınan veriler ile meteorolojik veriler

Saat	T _{giriş}	T _{çıkış}	T _ç - T _g	T _a	mC _p ΔT	η _{th}	(T _g - T _a)/G	Işınım (β)
09:00	4.78	3.81	-0.97	1.7	-0.50	-0.01084	0.04	76.6
10:00	6.70	5.34	-1.36	2.6	-0.69	-0.00898	0.03	128.9
11:00	10.46	9.51	-0.95	3.5	-0.48	-0.00402	0.03	200.4
12:00	12.19	15.18	2.99	4.4	1.53	0.010992	0.03	231.9
13:00	12.71	15.09	2.38	5.1	1.22	0.01383	0.05	146.7
14:00	10.79	11.34	0.55	5.5	0.28	0.007428	0.08	63.6
15:00	8.17	7.76	-0.41	5.8	-0.21	-0.00891	0.06	39.1

Bu saatte alınan güneş modülü elektriksel verileri kullanılarak modül verimi 0.0346 hesaplanmıştır.

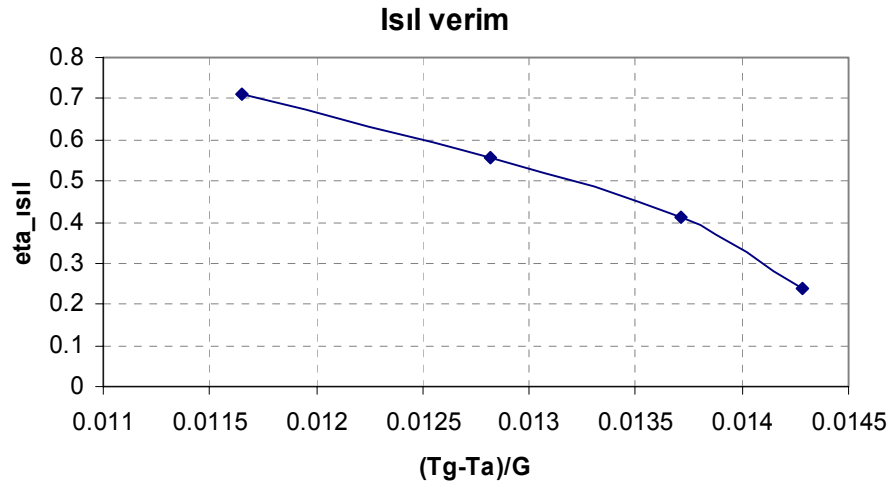
Tarih	Gerilim (V)	Akım (mA)	T _a (°C)	G(β)
25.12.05 12:00-13:00	15.6	294.34	5.6	221.4

PV/T sistem ısıl veriminin kış aylarında alınan ölçümler sonucu elde edilen verim değeriyle karşılaştırılabilmesi için 24.07.2004 günü incelenmiştir.

Tablo 4-3 24.07.2004 günü için verim hesaplamaları

	$T_{ç}(^{\circ}\text{C})$	$T_g(^{\circ}\text{C})$	$T_{ç}-T_g$	T_a	Q_u	η_{th}	$(T_g - T_a)/G$	$G(\beta)$
09:00	32.42	33.06	-0.34	29.81			0.0139	233.9
10:00	39.35	37.25	2.1	31.08	62.16	0.2401	0.0143	431.5
11:00	46.21	40.93	5.28	32.31	155.91	0.413135	0.0137	628.9
12:00	52.05	43.35	8.7	33.47	257.00	0.555853	0.0128	770.6
13:00	55.62	43.84	11.78	34.33	347.90	0.710651	0.0116	815.9
14:00	58.22	43.63	14.59	34.73	431.11	0.984906	0.0122	729.5

Doğal dolaşımli olarak çalışan sistemden alınan veriler ile meteorolojik veriler kullanılarak kütleli debi yeniden hesaplanmıştır. Saat 13:00-14:00 arasındaki ölçülen sıcaklık farkından yararlanılarak akışkan hızı için 18 iterasyon yapılmış ve 16. iterasyondan itibaren debi 0.007kg/s'ye yakınsamıştır. Hesaplanan debi değeri yerine konularak ve sıcaklık farkları da kullanılarak PV/T hibrid sistemin anlık verimi %71 olarak (Tablo 4-3), günlük verimi %85.7 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan verim değerleri $(T_g - T_a)/G$ 'ye karşı çizdirilmiştir (Şekil 4-15).



Şekil 4-15 Azaltılmış sıcaklığın işlevi olarak PV/T sistemin ısı verim eğrisi

4.2. Sıcaklığın Verime Etkisi

Sıcaklığın bir işlevi olarak elektriksel verim Eş.(4-2)'deki gibi tanımlanmıştır (Duffie ve Beckman, 1991). Bu eşitlikte silisyum verimi için verilen $-0.45^{\circ}\text{C}^{-1}$ değerindeki sıcaklık katsayısı yerine amorf silisyum için üretici firma tarafından verilen $-0.2^{\circ}\text{C}^{-1}$ değeri kullanılmıştır. Bu eşitlik ve ölçülen yüzey sıcaklık değerleri kullanılarak elektriksel verimin sıcaklıkla değişimi analiz edilmiştir. Burada η_0 Eş. (4-1)'den elde edilen standart test koşullarındaki (STC) verimdir.

$$\eta_e = \eta_0 (1 - 0.002[T_{hücre} - 25^{\circ}\text{C}])$$

Şekil 4-15'te verimin sıcaklığa göre değişimi çizdirilmiştir. Bu grafikten de görüldüğü gibi a-Si güneş modülü için verimin artırılması amacıyla soğutma yapmaya gereksinim duyulmamaktadır. Güneş modülünün satın alınması doktora tezinin konusunun belirlenmesinden

sonra yapıldığı için başta ortaya konan toplayıcı yutucu yüzeyine güneş modülünün yapıştırılarak hücre sıcaklığının düşürülmesi yerine güneş modülü kollektör örtüsü olarak kullanılmıştır. Modülün %10 geçirgenliği sayesinde yutucu yüzeyin üzerine az miktarda da olsa güneş ışınımının gelmesi sağlanmıştır. Yapılan diğer çalışmalarda güneş modülü tamamen yutucu yüzeye gelen güneş ışınımını engellemekte, yalnızca güneş modülünün artık ısısını kullanmaktadır.



Şekil 4-16 Güneş modülünün veriminin hücre sıcaklığına bağlı olarak değişimi

Yapılan verim hesaplamaları Tablo 4-4'te özetlenmiştir. Bu sonuçlara göre pompa ile çalışan termal toplayıcının ısı verimi doğal dolaşimli olana göre artmıştır. Doğal dolaşimli PV/T sistemin yaz aylarındaki termal verimi %71 oranında gerçekleşmiştir. Ocak ayı boyunca zorlanmış dolaşimli olarak çalıştırılan PV/T sistemin aylık verimi ölçülen sıcaklık ve meteorolojik verilerden yararlanılarak hesaplanmış ve %26 olarak bulunmuştur. Bu da kış aylarında sistemin veriminin zorlanmış dolaşım ile daha iyileştiğini göstermektedir.

Tablo 4-4 Çalışmalar sonucunda elde edilen verim değerlerinin karşılaştırması

PV/T Sistem	η_e (%)	η_{th} (%)	η_{PVT} (%)	Tarih	Açıklama
Termal (doğal dolaşimli)	4.2	41	---	29.8.05	Modelden hesaplanan
Termal (zorlanmış dolaşimli, pompa 1.kademe)	4.2	59.5	---	15.9.05	Modelden hesaplanan
Termal (zorlanmış dolaşimli, pompa 1.kademe)	4.2	52	---	15.9.05	Ölçülen
Termal (doğal dolaşimli)	4.2	49	---	21.12.05	Ölçülen
PV/T (doğal dolaşimli)	4.2	71	75.2	24.7.04	Ölçülen
PV/T (doğal dolaşimli)	3.5	1.1	4.6	25.12.05	Ölçülen
PV/T (zorlanmış dolaşimli, pompa 1.kademe)	3.6	26	29.6	01.2006	Ölçülen (aylık verim)

Literatürde toplam verim olarak adlandırılan η_{PVT} , üretilen elektrik ve ısı enerjisi toplamının gelen güneş enerjisine oranı olan “enerji oranı”dır.

Ölçülen bu ısıl verim değerleri Sandnes ve Rekstad’ın (2002) çalışmalarında elde edilen optik verim (Tablo 2-2) ile karşılaştırıldığında tek başına çalışan termal sistemin verimi %17 oranında daha düşük çıkmıştır. PV/T sistem ısıl verimi ise yaklaşık olarak aynı değerdedir. Yapılan çalışmalarda kullanılan güneş pilleri verimleri farklı olduğu için toplam verim karşılaştırmasına dâhil edilmesi yanıltıcı olacaktır. Sandnes ve Rekstad’ın bu çalışması özel kollektör ve güneş modülü tasarımına sahip,

ticari modül ve kollektörün kullanılmadığı bir çalışma olduğundan verim değerleri yapılan diğer çalışmalara oranla da oldukça yüksektir.

Tripanagnostopoulos ve arkadaşlarının (2002) hibrid PV/T sistemler üzerine yaptıkları çalışmalardan ticari a-Si PV modül ve soğutma akışkanı olarak suyun kullanıldığı, cam örtüsüz ve yansıtıcıların kullanılmadığı sisteme ait $\eta_e = 0.06$ ve $\eta_{th} = 0.60-12.02(\Delta T / G)$ değerleri ile karşılaştırma yapıldığında ısı veriminin yaklaşık %10 oranında daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu çalışmada araştırmacıların kullandığı a-Si modül verimi %6 iken bu doktora tez çalışmasında kullanılan yarı-saydam a-Si modülün ölçülen verimi %4.2'dir.

Huang ve arkadaşları (2001) tarafından yapılan çalışmada PV/T sisteme bir su tankı eklenerek bu kapalı sistemde gün boyunca değişen giriş sıcaklığı ölçülmüş ve diğer çalışmalardan farklı olarak ısı verim günlük test sonuçlarına göre belirlenmiştir ve 0.122 ile 0.445 arasında değişmektedir. Sistemin toplam verimi 0.38 olarak ölçülmüştür. Bu doktora tez çalışmasına en yakın sistem olarak Huang ve arkadaşları (2001) tarafından yapılan çalışma ile karşılaştırma yapıldığında ısı veriminin iki katı kadar çıktığı görülmektedir.

Zondag ve arkadaşlarının (2002) yaptıkları çalışmada PV/T sistemin günlük çıkışı belirlenerek hesaplanan ısı verim değerleri olan termal sisteme ait %54 ve PV/T sisteme ait %33 ısı verim değerleri incelendiğinde de yine bu doktora tez çalışmasında daha yüksek ısı verimleri elde edildiği açıktır.

Ancak karşılaştırmalar denemelerin yapıldığı iklim koşulları, mevsimsel farklılıklar, sistemlerin benzerliği gibi faktörler dikkate

alınmadan yapıldığı için çok belirleyici olmamaktadır. PV/T hibrid sistemler için de termal kolektörlerde olduğu gibi standart test koşulları getirildiğinde yapılan çalışmaların karşılaştırılabilir olacağı açıktır.

5. SONUÇLAR, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

5.1. Sonuç ve Tartışma

Bu tez, yarı-saydam a-Si güneş pili kullanılmasıyla güneş ışınımının %10 oranında yutucu yüzeye geçirilmesi sağlanarak PV/T sistemin ısı kısmının enerji girişinin artırılacağını, soğurma düzeyi %95'ten yüksek ve yayma düzeyi %5'ten düşük olan selektif **TiNOX®** titanium yutucu yüzey ile daha yüksek ısı verim sağlanarak birleşik PV/T sistemlerde ısı verimin artacağını önermektedir.

Aynı zamanda özel sistem tasarımları yerine ticari olarak kullanılan PV modül ve termal toplayıcının kullanılması da PV/T sistemlerin yaygınlaşması çalışmasında öncülük eden araştırmacılara destek olacak ve maliyetin özel tasarımlara oranla daha düşük olmasından dolayı da bu sistemlerin fabrika üretimlerini cazip hale getirecektir.

Birleşik güneş pili ve termal toplayıcı kullanımı binaların çatısında daha az yer kaplayarak hem alan tasarrufu sağlamakta hem de elektrik enerjisinin yanı sıra sıcak su ihtiyacını da karşılayacaktır. Özellikle güneşin bulunduğu saatlerde aktif olarak kullanılan okullar ve bazı işyerlerinde depolama elemanı boyutu küçüldüğü için sistem ilk kurulum maliyetleri de düşecektir.

Güneş pili / Termal Toplayıcı (PV/T) hibrid sisteminin elektriksel ve ısı verimi incelenerek binaların elektrik, sıcak su ve ısıtma gibi gereksinimlerinin karşılanmasında kullanılabilirliği araştırıldı. Bu amaçla bir yarı saydam PV modül ve Titanium Dioksit kaplamalı düzlemsel

toplayıcı beraber kullanıldı. Kurulan hibrid sistemden maksimum verimin elde edilebilmesi için optimizasyon yapıldı.

Bu çalışmada amorf silisyum güneş pilinin %10 oranındaki geçirgenliğinden termal toplayıcıya güneş ışınımının belirli bir yüzdesinin aktarması amacıyla yararlanıldı.

Sistem doğal dolaşımli ve zorlanmış dolaşımli olarak çalıştırılarak verim incelendi. PV/T panelin verimi termal toplayıcı ve güneş modülü verimleriyle karşılaştırıldı.

Deneylein ilk aşamasında PV modül ile yutucu yüzey arasında 2 cm'lik hava boşluğu bırakılarak sistem verimi incelendi ve giriş ve çıkış suyu sıcaklıkları arasında 5-6°C'lik bir fark gözlemlendi.

Sıcaklık sensörleri ile ölçülen kollektör giriş, çıkış ve depo suyu sıcaklıkları ile Güneş Enerjisi Enstitüsü binasında ölçülmekte olan güneş ışınımı, rüzgâr hızı ve ortam sıcaklığı değerleri kullanılarak PV/T sistemin ısı verimi belirlendi ve $(T_g - T_a)/G$ 'nin bir işlevi olarak gösterildi.

PV/T sistemin ısı veriminin değerlendirilebilmesi için Bergene ve Lovvik (1995) tarafından yapılan modelleme ve Hottel-Whillier düzlemsel toplayıcı modelinden (Duffie ve Beckman, 1991) yararlanıldı ve sistemin matematik modeli oluşturuldu. Matematik modelleme MATLAB'de yazıldı. Kurulan sistemdeki deneysel sonuçlar ile modelde hesaplanan değerler karşılaştırıldı.

Güneş modülü hücre sıcaklıkları sıcaklık sensörleri, akım ve gerilimi akım sensörü ve gerilim algılayıcı devre ile ölçülerek güneş modülünün verimi belirlendi. Geliştirilen matematik modelleme MATLAB'de yazıldı.

Deneysel olarak elde edilen verim değeri %4.35, matematik modelden elde edilen verim değeri %6.12 olarak bulundu. Ölçülen hücre sıcaklığı 42°C ve modelden hesaplanan 44°C'dir. Ölçülen akım 519.7mA, hesaplanan 678.1mA'dir. Dolayısıyla modelden hesaplanan verim daha yüksek çıkmaktadır. Modellemede kullanılan bazı güneş modülü hücre parametreleri üretici firma tarafından sağlanmadığından yapılan yaklaşımlar sonucu I-V eğrisi gerçek değerden çok ideal eğriye yaklaştı. Bunun sonucu olarak da modelden hesaplanan akım değerleri gerçek akım değerlerinden biraz yüksek çıktı.

Kullanılan yarı saydam a-Si güneş modülünün ölçülen hücre sıcaklıkları için sıcaklığın elektriksel verim üzerine etkileri incelendi ve verimde önemli bir düşüş gözlemlenmedi. Bunun nedeni kullanılan güneş modülünün güç sıcaklık katsayısının tek kristal güneş pilleri güç sıcaklık katsayısının yarısından da düşük olmasıdır.

PV/T hibrid sistemi verimi ile güneş modülü ve termal sistemin verimleri karşılaştırıldı. Termal toplayıcının tek başına çalışması sonucu daha önce incelenen günlere göre çıkış suyu sıcaklığında 30°C kadar artış oldu. Bu da daha önce güneş modülünün toplayıcı yutucu yüzeyini %90 oranında gölgelemesinden kaynaklanmıştır.

Sistem verimini etkileyen faktörlerden biri olan debinin etkisinin incelenmesi için güneş kollektör sistemleri için kullanılan üç devirli bir pompa eklendi. Pompanın 1. kademedeki 1,27m³/h'lik debi, 950 dev/dak hızda çalıştırılması sonucu depoya ısı transferi gerçekleşti ve depo suyu sıcaklığı çıkış suyu sıcaklığına ulaştı. Pompa 2. kademedeki 1400 dev/dak'da çalıştırıldığında da kapalı sistemde dolaşan suyun ısını depoya aktararak

depo suyu sıcaklığını artırdığı görüldü. Pompanın durdurulup yeniden çalıştırılmasına kadar geçen sürede ise giriş ve depo suyu sıcaklıklarında belirgin bir düşüş oldu. Doğal dolaşimli PV/T kollektör sistemi yerine pompa ile zorlanmış dolaşımında depoya aktarılan ısı miktarındaki artıştan dolayı depo suyu sıcaklığı arttı. Doğal dolaşimli çalışan termal sistemin verimi %41 iken pompa ile çalıştırıldığında verim %59.5'e yükseldi. Zorlanmış dolaşımın verimi artırdığı görüldü.

5.2. Öneriler

Binalarda sıcak suyun yanı sıra elektriğin de güneşten üretmenin yaygınlaşması çevre kirliliğini önemli ölçüde azaltacaktır. Daha yaygın kullanımını sağlayabilmek için PV/T sistemin veriminin artırılması gerekir. Bu nedenle sistemde kullanılan a-Si güneş pili yerine tek kristal yarı saydam güneş pilinin kullanılması verimi artıracaktır. Ancak ilk yatırım maliyetinin yüksek olmasına rağmen ülke ekonomisine ve çevreye katkıları uzun vadede olumlu olacaktır.

Kurulan PV/T Hibrid Sistemle İlgili Öneriler:

- Modülün güç sıcaklık katsayısının düşük olmasından dolayı yüzey sıcaklığının PV/T sistemdeki termal toplayıcıdan akışkan dolaştırarak düşürülmesi denenmedi. Bu amaçla yutucu yüzey ile güneş modülünün yapıştırılması gerekiyordu ki bu da titanium dioksit kaplamanın özelliğini bozacağı için sistem verimini düşürecekti. Ancak termal toplayıcıdaki verim düşüşüne rağmen güneş modülü veriminde artış olup olmadığı araştırılabilirdi.

Güneş Modülü ile İlgili Öneriler:

- PV/T sistemin toplam verimini artırmak için verimi %4.5 olan amorf silisyum yerine verimi %10.5 olan tek kristal yarı saydam güneş pili kullanılabilirdi. Ancak tek kristal güneş pilinin güç sıcaklık katsayısının daha yüksek ($-0.4/^\circ\text{C}$) olmasından dolayı sıcaklık artışıyla veriminin düşmemesi için yutucu yüzeye yapıştırılması gerekirdi.

Termal Toplayıcı ile İlgili Öneriler:

- Depo hacmi büyük seçildi. Daha küçük boyutlu bir depo kullanılarak depo suyu sıcaklığının artırılması sağlanabilirdi.
- Akış hızı sıcaklık farkı kullanılarak hesaplandı. Maliyeti karşılanabildiği takdirde bir akış ölçer satın alınarak veri toplama ünitesine bağlanmalıdır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Atagündüz, G., 1989, Güneş Enerjisi Temelleri ve Uygulamaları, Ege Üniversitesi, İzmir, 372 s.

Atagündüz, G., 1983, Isı Transferi, Ege Üniversitesi, İzmir, 187 s.

Başaran, T., 2002. Kapalı Termosifon Döngüsünde Akış ve Isı Transferinin Teorik ve Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, D.E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü, Enerji A.B.D., İzmir

Bergene, T. and Lovvik, O.M., 1995. Model calculations on a flat plate solar heat collector with integrated solar cells, *Solar Energy*, Vol.55, No. 6, pp. 453-462

Duffie, J. A. and Beckman, W. A., 1991. Solar Engineering of Thermal Processes, ISBN 0471510564

Erkaya, K. ve Çolak, M., 1998. Fotovoltayik-fototermik Dönüştürücülerde Verim Optimizasyonu, Doktora tezi, E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Güneş Enerjisi A.B.D., İzmir

Garg, H.P. and Agarwal, R.K., 1995. Some aspects of a PV/T collector/ forced circulation flat plate solar heater with solar cells, *Energy Conversions and Management*, Vol. 36, No. 2, pp. 87-99

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Hansen, A.D., Sorensen, P., Hansen, H.L., Bindner, H.,** 2000. Models for a Stand-Alone PV System, Risø-R-1219(EN) – SEC – 12, RISØ National Laboratory, Roskilde
- Hegazy, A.A.,** 2000. Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors, *Energy Conversions and Management*, Vol. 41, pp. 861-881
- Huang, B.J.; Lin, T.H.; Hung, W.C.; Sun, F.S.,** 2001. Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems, *Solar Energy*, Vol.70, No. 5, pp. 443-448
- Ji, J., Chow, T.-T., He, W.,** 2003. Dynamic performance of hybrid photovoltaic/thermal collector wall in Hong Kong, *Building and Environment*, Vol. 38, pp. 1327-1334
- Jones, A.D. and Underwood, C.P.,** 2000, A thermal model for photovoltaic systems, *Solar Energy*, Vol.70, No. 4, pp. 349-359
- King, D. L., Kratochvil, J. A., Boyson, W. E.,** Photovoltaic Modules: Efficiency, Comparisons, and Energy Production, Sandia National Laboratories
- Krauter, S.; Araujo, R.G.; Schroer, S.; Hanitsch, R.; Salhi, M.J.; Triebel, C.; Lemoine, R.,** 1999.. Combined photovoltaic and solar thermal systems for facade integration and building insulation, *Solar Energy* Vol.67, Nos.4-5, pp. 239-248

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Lodhi, M.A.K.**, 1995, A hybrid system of solar photovoltaic, thermal and hydrogen: a future trend, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 20, No. 6, pp. 471-484
- Meyer, E.L. and van Dyk, E.E.**, 2003. Characterization of degradation in thin-film photovoltaic module performance parameters, *Renewable Energy*, Vol. 28, pp. 1455-1469
- Sandnes, B. and Rekstad, J.**, 2002. A photovoltaic /thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate, experimental study and analytical model, *Solar Energy*, Vol.72, No. 1, pp. 63-73
- Skryabin, I., Phani, G., Tulloch, G.**, 1997. Sustainable Technologies Australia (STA) Titania Nanosritalline Solar Cell Project, EU/Australia Photovoltaic Workshop, Canberra
- Stutenbaeumer, U. and Mesfin, B.**, 1999. Equivalent model of monocrystalline, polycrystalline and amorphous silicon solar cells, *Renewable Energy*, Vol.18, pp. 501-512
- Tomas Markvart**, Solar electricity, ISBN 0471941611, 1994, ENGLAND
- Triapanognostopoulos, Y., Nousia, Th., Souliotis, M., Yianoulis, P.**, 2002, Hybrid photovoltaic/ thermal solar systems, *Solar Energy*, Vol.72, No. 3, pp. 217-234

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Zambrano, R.J., Rubinelli, F.A., Arnoldbik, W.M., Rath, J.K., Schropp, R.E.I., 2004. Computer-aided band gap engineering and experimental verification of amorphous silicon–germanium solar cells, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 81, pp. 73–86

Zondag, H.A., de Vries, D.W., van Helden, W.G.J., van Zolingen, R.J.C., van Steenhowen, A.A., 2002. The thermal and electrical yield of a PV-thermal collector, *Solar Energy*, Vol.72, No. 2, pp.113-128

Baymak web sayfası, 2004, <http://www.baymak.com.tr/Page/urunler.html>

Circulating Pumps, Ltd. web sayfası, 2006

<http://www.circulatingpumps.net/UpDocs/files/Compact.pdf>

Eziç Metal web sayfası, 2004. <http://www.ezincmetal.com/tr/urunler.html>

Mekatronik web sayfası, 2006. <http://www.mekatronik.com.tr>

<http://www.nrel.gov/FEMP> - Solar Water Heating.htm, U.S. Department of Energy by the National Renewable Energy Laboratory, NREL EL-May 1996

RWE Schott Solar web sayfası, 2004. <http://www.rweschott.de> , <http://www.rwesolar.com>

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Sentron web sayfası, 2005. <http://www.sentron.ch>

Sunways web sayfası, 2004. <http://www.sunways.de>

Tinox web sayfası, 2004. <http://www.tinox.com>

EKLER

EK 1 MATLAB Ortamında Yazılan Güneş Pili Matematik Modeli

Güneş pili matematik modeline ait akış şeması ve MATLAB ortamında yazılan m dosyası (nlr.m) aşağıdadır:

```
function f=nlr(x);  
  
% sabitler  
  
k=1.381e-23;  
q=1.602e-19;  
nd=1;  
nr=4;  
  
% Referans Modül parametreler  
  
Ga0=1000;  
Tc0=25+273;  
Voc0=49;  
Isc0=1.02;  
uVoc=3.3e-3;  
uIsc=8.0e-4;  
Vm0=36;  
Im0=0.75;  
Pm0=Im0*Vm0;  
N=30;  
A=0.6;
```

```

%Modül verimi, %eta
eta0=(Pm0/(Ga0.*A))*100

%hücre değerlerinin hesaplanması
Pmc=Pm0/N;
Vocc0=Voc0/N;
Isc0=Isc0;
Vtd0=nd*k*Tc0/q;
Vtr0=nr*k*Tc0/q;
voc0=Voc0/Vtr0;
FF=(voc0-log(voc0+0.72))/(voc0+1);
FF0=Pm0/(Voc0*Isc0);
rs=1-FF0/FF;
Rs=rs*Voc0/Isc0;
Ta=20+273;
Tcref=49+273;
Ga=750;

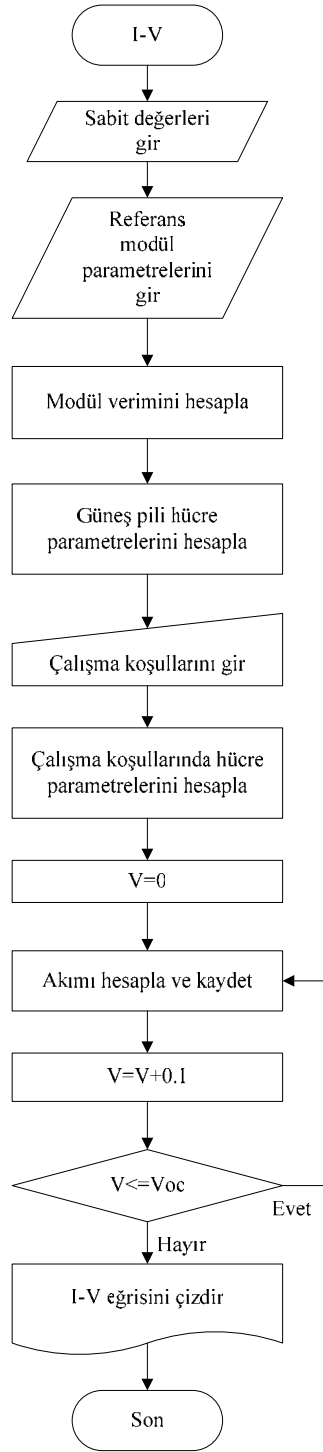
%çalışma koşullarında hücre parametreleri
c1=Isc0/Ga0;
Isc=c1*Ga;
c2=(Tcref-Ta)/Ga0;
Tc=Ta+c2.*Ga;
Vocc=Vocc0-uVoc*(Tc-Tc0);
Vtd=nd*k*Tc/q;

```

```
Vtr=nr*k*Tc/q;
Il=(Ga./Ga0).*(Isc0+uIsc*(Tc-Tcref));

%Difüzyon akımı: x(1)
x(1)=1.3553e-28;
%Rekombinasyon akımı:x(2)
x(2)=1.5007e-07;

V=[0:0.1:Vocc0];
y=x(1)*exp(V/Vtd0)
z=x(2)*(exp(V/Vtr0)-1)
f=x(1)*(exp(V/Vtd0)-1)+x(2)*(exp(V/Vtr0)-1)
I=[Il-f];
hold on
%plot(V,I);
plot(V,I);
hold off
grid on
zoom;
```



EK 2 MATLAB Ortamında Yazılan Termal Toplayıcı Matematik Modeli

Termal toplayıcı matematik modeline ait akış şeması ve MATLAB ortamında yazılan m dosyası (TModel29A.m) aşağıdadır:

Verim Hesabı

```
function Qakiskan=enerji(QF)

% delta absorber kalinligi, sigma Boltzman sbt, beta egim,k: Tinox isi
iletim katsayisi

% sabitler,

k=8.4;

delta=0.2*10^-3;

L=1;

D=12*10^-3;

W=10*10^-2;

Ac=0.6;

beta=38.46;

teta=15.15;

sigma=5.67*10^-8;

pi=22/7;

% Meteoroloji istasyonu verileri

Ga=711.4;

Ta=31.1+273;

vr=1.8;
```

% Kollektör için parametreler

Ti=76.09+273;

To=86.01+273;

%Yutma_alfa-geçirme_to-yayma_eps ve yansıtma_ro değerlerinin girilmesi

%örtü malzemesi için

alfaC=0;

toC=0.72;

epsC=0.88;

%güneş pili için

alfaS=0.6;

toS=0.10;

epsS=0.04;

roS=0.4;

%yutucu yüzey için

alfaA=0.95;

epsA=0.05;

% Akışkan parametreler, mf: kütleli debi

Cp=4190;

mf=0.01;

%Re>2300 akış turbulanslı

hfi=500;

% Ust ısı iletim katsayısının hesaplanması için eşitlikler

N=1;

```

C=520*(1-0.000051*beta^2)
hr=5.7+3.8*vr
f=(1+0.089*hr-0.1166*hr*epsA)*(1+0.07866*N)
% Ortalama to-alfa hesabi, alfa oranı
alfao= 1+2.0345*(10^-3)*teta-1.99*(10^-4)*teta^2+5.324*(10^-6)*
teta^3-4.799*(10^-8)*teta^4;
toab=1.02*toC*alfaA;
toa=0.96*toab
%Yutucu yüzey için yararlı ışınım
S=toa*Ga
% yutucu yuzey sıcakligi
Tpm=Ti+10;
e= 0.430*(1-(100/Tpm));
% Ust isi iletim katsayisinin hesaplanmasi
Ut=((N/((C/Tpm)*((Tpm-Ta)/(N+f))^e)+(1/hr))^-1)+
(sigma*(Tpm+Ta)*(Tpm^2+Ta^2))/(((epsA+0.00591*N*hr)^-1)+ (2*N+f-
1+0.133*epsA-N)/epsC)
%Yararli isinin hesaplanmasi
Qu=Ac*(S-Ut*(Tpm-Ta))
m=sqrt(Ut/(k*delta));
% Kanaticik verim faktorunun hesaplanmasi
F=tanh(m*((W-D)./2))/(m*(W-D)./2)
% Toplayici verim faktorunun hesaplanmasi
F1=(1/Ut)/(W*(1/(Ut*(D+(W-D)*F)+(1/(pi*D*hfi))))))

```

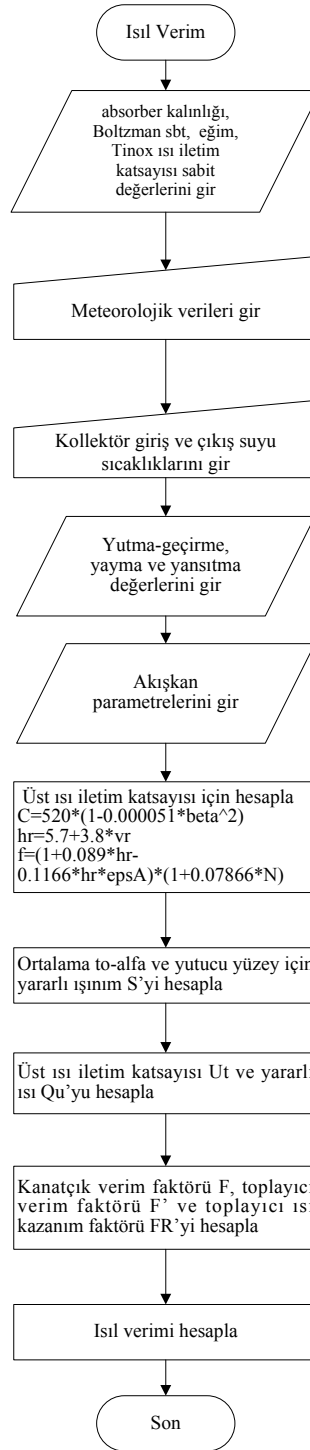
% Toplayici isi kazanim faktorunun hesaplanmasi

$$FR = \frac{(mf \cdot Cp)}{(Ac \cdot Ut)} \cdot (1 - \exp(-\frac{Ac \cdot Ut \cdot F1}{mf \cdot Cp}))$$

$$Qu1 = Ac \cdot FR \cdot (S - Ut \cdot (Ti - Ta))$$

% Isil verimin hesaplanmasi

$$\eta = Qu / (Ac \cdot Ga)$$



EK 3 Deney Düzenğinde Kullanılan Cihazlara ait Teknolojik Veriler

A. POMPA (Circulating Pumps Ltd.)



CP 53'ün görünüşü

Uygulama Alanı

Seçilen pompa CP 53, güneş kollektör sistemleri için kullanılır.

Teknik Değerler

- Ağırlık: 2.8Kg
- Maksimum çalışma sıcaklığı: 110°C
- Maksimum ortam sıcaklığı: 55°C
- Maksimum statik basınç: 10 Bar
- Önerilen minimum debi: 5 lt/dak

Çalışma Koşulları

110°C'ta su pompalanırken kavitasyonu engellemek ve sessiz çalışmayı sağlamak için minimum dinamik basınç yüksekliği 11 metre su sütunu olmalıdır.

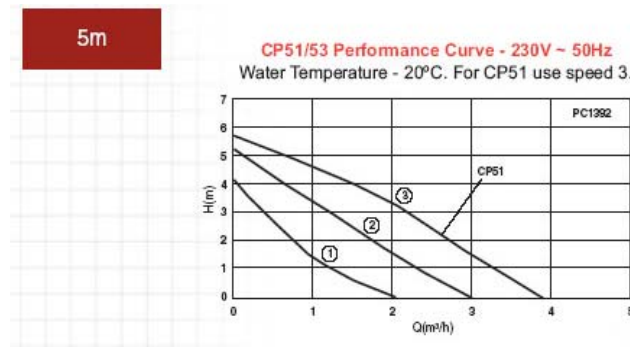
Minimum Statik Basınç Yüksekliği

Açık sistemlerde CP pompaları, minimum statik basınç yüksekliği 300mm olan, pompa girişinin nötr noktasına yakın olduğu ve su sıcaklığının 80°C'yi aşmadığı sistemlere uygundur.

Elektriksel Özellikler

Hız kademesi	Devir hızı (rpm)	Çekilen güç (W)	Akım (A)
1	950	56	0.26
2	1400	78	0.35
3	1850	104	0.45

Circulating Pumps CP 53 Pompa karakteristiği (Su sıcaklığı @20°C)



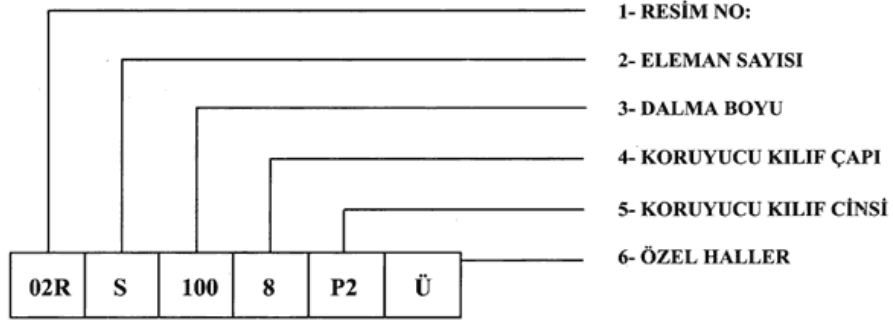
B. Pt-100 DİRENÇSEL SICAKLIK SENSÖRÜ (Metronik Ölçü Kontrol ve Termoeleman San. ve Tic. A.Ş. - Tron)

Dirençsel sıcaklık sensörleri -200 C'den +850 C'ye kadar çok çeşitli proseslerde yaygın olarak kullanılan sıcaklık algılayıcı sensörlerdir. Hassas ölçüm alınmak istenen düşük sıcaklıklarda daha doğru değerler verdikleri için tercih edilirler. Dirençsel sıcaklık sensörleri ile sıcaklık ölçülmesinde metallerin sıcaklığa bağlı olarak dirençlerinin değişmesi özelliğinden yararlanılır. Dirençsel sıcaklık elemanı özgül direnci sıcaklıkla değişen pasif bir elemandır.

Dirençsel sıcaklık sensörleri sıcaklık ile direnç değişimleri incelendiğinde çeşitli metal alaşımlar içerisinde tekrar edilebilirliği ve yüksek doğrusallığı nedeni ile platin veya nikel tellerden üretilmektedir. Termorezistans sezgi elemanı platin veya nikel tellerden sarılan direncin seramik, mika veya cam gibi izolatör malzemelerin içine yerleştirilmesinden meydana gelir.

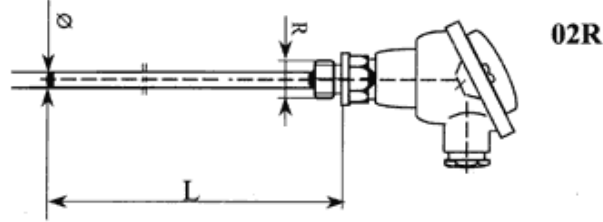
Dirençsel sıcaklık elemanı Pt 100 veya Ni 100,DIN 43760'a uygun direnç değerleri vermektedir. Endüstride 0°C'deki nominal dirençlerinin 100 ohm olacak şekilde üretilmesine rağmen 500ohm (Pt 500), 1000 ohm (Ni 1000) olarak'ta üretilebilirler. Dirençsel sıcaklık sensörü ile ölçü cihazı arasındaki bağlantı 2, 3 veya 4 telli olarak imal edilir.

Dirençsel Termometre Kodlama Tablosu



RESİM NO:	01R,02R,03R,04R,05R,06R,07R,08R,09R,10R,11R,12R,13R,14R,15R,16R,17R,18R	Termorezistansların imalat şekilleri değişik resim numaraları ile numaralandırılmıştır.
ELEMAN SAYISI	S (Tek elemanlı) W(Çift elemanlı)	Termorezistansların tek elemanlı veya çift elemanlı olmasına göre haneye S veya W yazılır.
DALMA BOYU	50mm, 100mm,150mm,200mm,250mm,350mm,500mm,710mm	Haneye termorezistansların dalma boyu yazılır.Burada verilen boylar standart olup diğer boylarda'da üretilebilir.
KILIF ÇAPI	2mm,3mm,4mm,5mm,6mm,8mm,10mm,22mm,	Haneye termorezistansların koruyucu kılıf çapı yazılır.Burada verilen çaplar standart olup,diğer çaplarda'da üretilebilir.
KORUYUCU KILIF	P1 (304 SS),P2 (316 SS),BR (Prinç), P2T(Teflon kaplı 316 SS)	Haneye dış koruyucu kılıf cinsi yazılır. Koruyucu kılıflar proses çaplarına uygun seçilmelidir.
ÖZEL HALLER	3 Telli (Ü) , 4 Telli (D) , Özel (Ö) ,Rekor (R), Ni 100, Ni 1000,Pt 50,Pt 500,Pt 1000,Pt 2000,diğer 4-20mA kafa içi çevirici (T),Kablo boyu (1mt.2mt.vb)	Haneye termorezistansların özel durumları belirtilir.Örneğin: Termorezistans üç telli üretildi ise (Ü) ile belirtilir.

Deney Düzeneginde Kullanılan Dirençsel Termometre, Pt-100'ün Fiziksel Özellikleri



- B tipi terminal kutusu ile imal edilen rekorlu tip dirençsel sıcaklık algılayıcıdır. Standart rekoru ½” olup tam kafanın altına monte edilir.
- Eleman sayısı: S (tek elemanlı)
- Dalma boyu: 2 adet 50mm, 1 adet 100mm
- Kılıf çapı: 8 mm
- Koruyucu kılıf: P2 (316 SS)
- İki telli eleman

Elektriksel Özellikleri

- 0°C'deki nominal direnç 100Ω
- 0 - 100°C arası sıcaklık katsayısı, $\alpha_0 = 3.85 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Sıcaklık – Direnç Tablosu

DIN 43 760 uygun
Sıcaklık-Direnç tablosu

Nominal rezistans = 0°C'de 100 ohm
0 ve 100°C arasında T.C = $3,85 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	W/C1)
0	100.00	103.90	107.79	111.67	115.54	119.39	123.24	127.07	130.89	134.70	138.50	0.385
100	138.50	142.29	146.06	149.82	153.58	157.32	161.04	164.76	168.47	172.16	175.84	0.373
200	175.84	179.51	183.17	186.82	190.46	194.08	197.69	201.30	204.88	208.46	212.03	0.361
300	212.03	215.58	219.13	222.66	226.18	229.69	233.19	236.67	240.15	243.61	247.06	0.350
400	247.06	250.50	253.93	257.34	260.75	264.14	267.52	270.89	274.25	277.60	280.93	0.338
500	280.93	284.26	287.57	290.87	294.16	297.43	300.70	303.95	307.20	310.43	313.65	0.327
600	313.65	316.86	320.05	323.24	326.41	329.57	332.72	335.86	338.99	342.10	345.21	0.315
700	345.21	348.30	351.38	354.45	357.51	360.55	363.59	366.61	369.62	372.62	375.61	0.305
800	375.61	378.59	381.55	384.50	387.45	390.38	-	-	-	-	-	0.295

C. AKIM SENSÖRÜ, D-CSA-1V (SENTRON Co.)

Sentron akım sensörü CSA-1V CMOS teknolojisiyle üretilmiş ilave ferromanyetik katmana sahip bir Hall-sensördür. Ferromanyetik katman, sensörün doğasında olan gürültüyü artırmadan çıkış sinyalini artırmak için 10 civarında ilave manyetik kazanç sağlayan bir manyetik akı yoğunlaştırıcısı olarak kullanılır.

Elektriksel Özellikleri

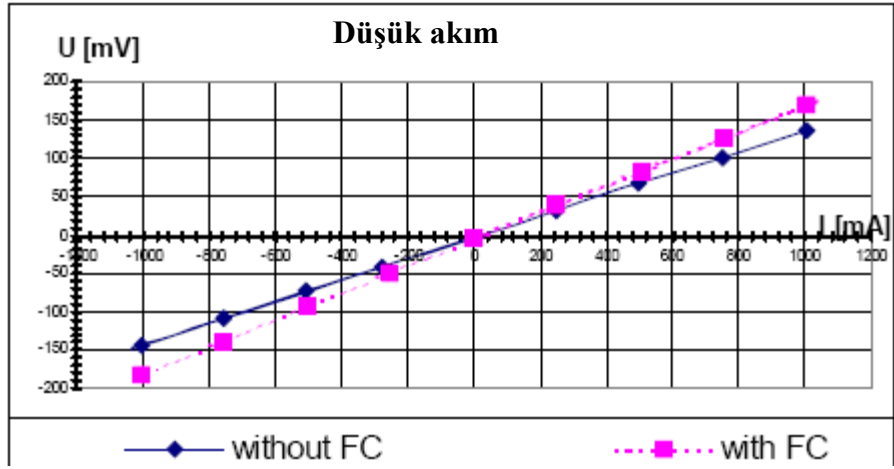
- Yüksek duyarlık
- Kolay kullanılabilir akım sensörü
- 0.1 - 100 A çalışma aralığı
- Düşük gürültü
- Çok düşük ofset ve ofset kayması
- Kazanç ve ofset programlama

Düşük akım aralığında çalışma:

- 2 Ampere kadar akım ölçümü
- Sinyal: 1A için 140 mV
- Çözünürlük yaklaşık 5 mA
- Doğrusallık %1'den daha iyi

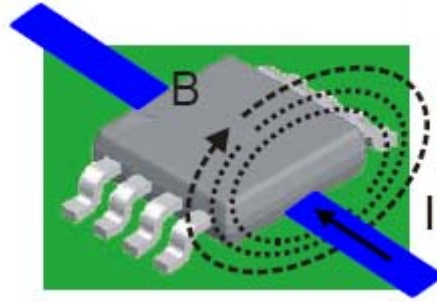
Baskı devre kartının arkasında sırasıyla bir manyetik kalkan ve bir akı yoğunlaştırıcısı (flux concentrator: FC) kullanılarak sensör dış manyetik alanlara karşı korunur. Duyarlık da çok az artar.

Karakteristik Eğri



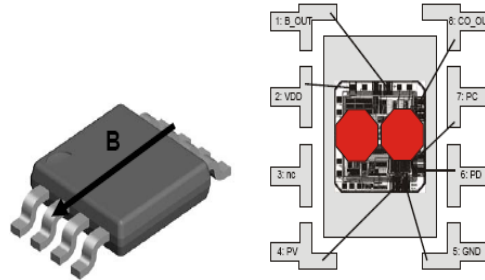
Akımın Ölçülmesi

Düşük ve orta akım aralığında akım taşıyan iletken şekilde görüldüğü gibi doğrudan akım sensörü yongasının altına yerleştirilerek akım ölçülür.



Akım Sensörü Bacak Bağlantıları

- 1) A_OUT: sensör analog çıkışı
- 2) VDD
- 3) NC
- 4) PV: gerilim programlama
- 5) GND
- 6) PD: veri programlama
- 7) PC: saat (clock) programlama
- 8) CO_OUT: ortak çıkış



SO-8 paket

D. VERİ TOPLAMA ÜNİTESİ (DLG 5 DATALOGGER)

Teknik Özellikleri

- 2 adet 0-10 mV analog giriş.
- 3 adet Pt-100 sıcaklık sensörü bağlanabilir giriş.
- 2 adet 0-2.5 Volt analog giriş.
- 1 adet 0-1 Volt analog giriş.
- 128 Kbayt veri saklama kapasitesi.
- 12 bit çözünürlük.
- RS-232C iletişim protokolü ile bilgisayara bağlanabilir.
- 2x16 karakter LCD gösterge.
- 12 Volt bataryadan veya adaptörden beslenebilir güç tüketimi tüm kanallar kullanıldığında maksimum 5 Watt'tır.
- Kayıt aralığı kullanıcı tarafından 1-256 dakika aralığında ayarlanabilir.
- Anlık değerler LCD göstergeden görüntülenebilir.
- Bellek dolduğunda kayıt işlemi otomatik olarak durdurulur.
- Ölçüm değerlerinin bilgisayara aktarılması için Windows 98 veya Windows XP işletim sistemi gerektirir.

ÖZGEÇMİŞ

1.Genel

DÜZENLEME TARİHİ: 04.08.2006
SOYADI, ADI: ENGİN, DİLŞAD
YAZIŞMA ADRESİ: E.Ü. EGE MES.YÜKSEKOKULU 35100 BORNOVA- İZMİR
TELEFON:232 3884000-1464
FAX: 232 3887599
E-POSTA: dilsad.engin@ege.edu.tr

2. Eğitim

ÖĞRENİM DÖNEMİ	DERECESİ	ÜNİVERSİTE	ÖĞRENİM ALANI
Şubat 2000 Ağustos 2006	Doktora	EGE Üniversitesi	Güneş Enerjisi Enstitüsü
Şubat 1993 Haziran 1996	Yüksek Lisans	EGE Üniversitesi	Güneş Enerjisi Enstitüsü
Eylül 1985- Ocak 1990	Lisans	HACETTEPE Üniversitesi	Mühendislik Fak. Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü.

3. Akademik ve Mesleki deneyim.

GÖREV DÖNEMİ	ÜN VAN	BÖLÜM	KURULUŞ
Ekim 1990 Kasım 1990	Öğr. Gör.	Gaziantep Meslek Yüksek Okulu Kontrol Sistemleri Teknolojisi Programı	Gaziantep Üniversitesi
Kasım 1990 Ocak 1991	Misafir Öğr. Görevlisi	Foreign Students Education	Ferris State University, USA
Şubat 1991 Ağustos 1991	Misafir Öğr. Görevlisi	Instrumentation	New River Community College, USA
Ağustos 1991 Ağustos 1992	Öğr. Gör.	Gaziantep Meslek Yüksek Okulu Endüstriyel Elektronik, Elektrik Programları	Gaziantep Üniversitesi
Ağustos 1992	Öğr. Gör.	Ege Meslek Yüksek Okulu Endüstriyel Otomasyon Programı	Ege Üniversitesi

4. Uzmanlık Alanları

UZMANLIK ALANI	ANAHTAR SÖZCÜKLER
Güneş Enerjisi	Güneş Pili, Termal toplayıcı, PV/T Hibrid sistem.
Otomasyon	Sayısal elektronik, PLC, Enstrümantasyon, sensörler

5. Yayın Listesi

1. Engin, Dilşad, Yaprak Büyüklüğünü Belirleyen Bir Ölçme Sisteminin Geliştirilmesi, Yüksek Lisans tezi, 1996, İzmir.
2. Engin Mustafa, Engin Dilşad, Başarık Cenap, Söke için güneş-rüzgar hibrid enerji üretim sisteminin boyutlandırılması, VI. Türk-Alman Enerji Sempozyumu, 6-10 haziran, 2001, İzmir.
3. Engin, Dilşad; Çolak, Metin, Photovoltaic and Thermal Collector (PV/T) Hybrid System's Performance Optimization. Eurosun 2006 Conference, 27-30 June 2006, Glasgow, UK.