



**Bu bir MMO  
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

## **BİNALARDA BÜTÜNLEŞİK GÜNEŞ ENERJİSİ UYGULAMA ÖRNEKLERİ**

**ERHAN KIRTEPE  
ALİ GÜNGÖR  
EGE ÜNİVERSİTESİ**



# BİNALARDA BÜTÜNLEŞİK GÜNEŞ ENERJİSİ UYGULAMA ÖRNEKLERİ

*Integrated Solar Energy Application Examples for Buildings*

**Erhan KIRTEPE**  
**Ali GÜNGÖR**

## ÖZET

Güneş enerjisi ile ilgili yapılan uygulamalar arasında sıcak su eldesi, elektrik üretimi, hacim ısıtma ve hacim soğutma gibi uygulamalar yer almaktadır. Bu uygulamaların tek tek kullanıldığı sistemler çok sayıda mevcuttur. Günümüzde ise birden fazla uygulamanın bir arada bulunduğu bütünleşik sistemlerin geliştirilmesi kapsamında yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Bu çalışmada da literatürde yapılan bütünleşik güneş enerjili sistemlerin araştırılması yapılmış ve termodinamik açıdan değerlendirilmeleri yapılarak bu sistemlerin karşılaştırılmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan araştırma içerisinde Fotovoltaik/Termal (PV/T) sistemler incelenmiş ve incelenen bu sistemler soğutulma şekillerine göre hava soğutmalı, su soğutmalı, ısı pompalı PV/T ve ısı boru borulu PV/T olmak üzere 4 grupta incelenmiştir. Literatürde yapılan incelemeler sonucunda elektriksel verimliliğin %19'lara ve sistem toplam verimliliğinin %70'lere kadar çıkarılabildiği bütünleşik sistemlerin olduğu görülmüştür. Ülkemizde de PV/T sistemlerin kullanılması ve bu sistemlerin geliştirilerek verimlerinin artırılmasına yönelik çalışmalar yapılması enerji verimliliği açısından son derece önemlidir.

**Anahtar Kelimeler:** PV/T (Fotovoltaik/Termal), Güneş Enerjisi, Isı Pompası, Bütünleşik Tasarım.

## ABSTRACT

Applications related to solar energy include applications such as hot water produce, electricity generation, volume heating and volume cooling. There are a large number of systems where these applications are used individually. Nowadays, work has been accelerated within the scope of the development of integrated systems in which more than one application coexists. In this study, integrated solar energy systems made in the literature have been investigated and the thermodynamic aspects have been evaluated and comparisons have been made between these systems. Photovoltaic/Thermal (PV/T) systems were investigated in these researches and they were investigated in four groups according to cooling types: air cooled, water cooled, heat pump PV/T and heat pipe PV/T. As a result of the studies done in the literature, it has been seen that integrated systems can be obtained which can increase the electrical efficiency by 19% and the integrated system total efficiency by 70%. The use of PV/T systems in our country and the development of these systems to improve their efficiency is very important in terms of energy efficiency.

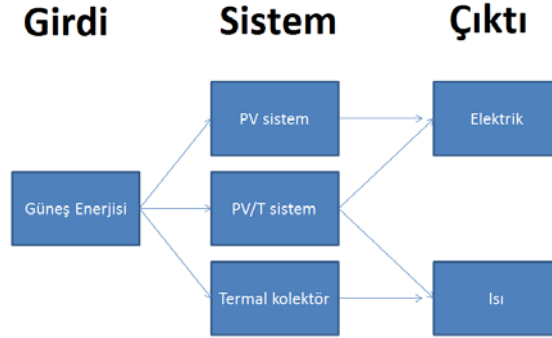
**Key Words:** PV/T (Photovoltaic/Thermal), Solar Energy, Heat Pump, Integrated Design.

## 1. GİRİŞ

Dünya'da gelişen teknoloji karşısında enerji tüketimi de hızla artmaktadır. Dünya genelinde enerjinin çoğu fosil kökenli yakıtlardan karşılanmaktadır. Fosil kökenli yakıtlarında hızla tükenmekte olması yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının önemini ön plana çıkarmaktadır. Bu nedenle rüzgar,

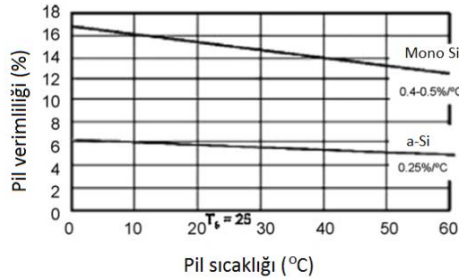
güneş, dalga enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarıyla ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. Bu yenilenebilir enerji kaynakları arasında özellikle Dünya'mızı ısıtan ve aydınlatan güneşten maksimum miktarda yararlanma konusunun önemi gün geçtikçe artmaktadır.

Güneşten iki şekilde enerji elde edebilmekteyiz. Bunlardan birincisi ısı enerjisi ikincisi ise fotovoltaik (PV) panelleri kullanılarak elde edilen elektrik enerjisidir. Fotovoltaik/Thermal (PV/T) sistemleri kullanarak da elektrik ve ısı enerjisini aynı anda elde edebilmekteyiz (Şekil 1).



Şekil 1. Güneşten enerji elde etme yolları [1].

Genellikle PV panellerin elektriksel verimliliği nominal çalışma koşullarında ( $0,8 \text{ kW/m}^2$  güneş radyasyonu,  $20^\circ\text{C}$  çevre sıcaklığı ve  $1 \text{ m/s}$  rüzgar hızı) %6 ila %18 arasında değişmektedir [2]. Fakat normal çalışma koşullarında gün içerisinde PV panellerin sıcaklığı giderek artmaktadır. PV panellerdeki her  $1^\circ\text{C}$  sıcaklık artışı kristal silisyum güneş pillerinin elektriksel verimliliğinde %0,4-0,5 ve amorf silisyum güneş pillerinin elektriksel verimliliğinde %0,25 oranında azalmaya neden olmaktadır (Şekil 2) [2, 3].



Şekil 2. PV'lerin çalışma sıcaklıklarının elektriksel verimleri ile ilişkisi [2].

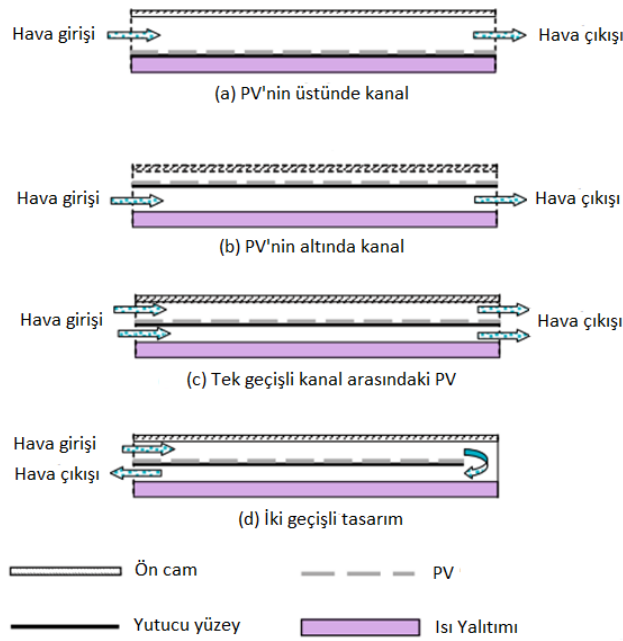
PV'lerin çalışma koşullarında sıcaklıklarının artması ve verimlerinin düşmesinin önüne geçebilmek amacıyla farklı uygulamalar denenmiştir. Bu uygulamalardaki esas amaç PV'lerin soğutularak çalışma sıcaklıklarının düşük mertebelerde tutulması ve elektriksel verimlerinde oluşabilecek kayıpların önüne geçmektir. Bunun için hem elektrik enerjisinin üretildiği ve hem de ısı enerjisinin elde edildiği PV/T sistemler kullanılmaya başlanmıştır. Buradaki asıl amaç bir yandan elektrik enerjisi üretilirken bir yandan da PV'lerin üzerindeki ısının çekilerek elektriksel verimlerinin düşmesini önlemek ve ayrıca ısı enerjisi elde edilerek toplam sistem performansının artırılmasını sağlamaktır.

PV/T'ler kullandıkları soğutucu akışkana göre dört grupta sınıflandırılabilirler.

- Hava ile soğutmalı PV/T sistemler,
- Su ile soğutmalı PV/T sistemler,
- Isı pompalı PV/T (soğutucu akışkan kullanılarak soğutma yapılıyor) sistemler,
- Isı borulu PV/T sistemler.

## 2. HAVA İLE SOĞUTMALI PV/T

PV/T içerisinde soğutucu akışkan olarak havanın kullanıldığı sistemlerdir. Şekil 3'te farklı hava ile soğutmalı PV/T şekilleri görülmektedir. Bu şekilden de görüleceği üzere hava PV/T içerisinde farklı geçiş sayılarında ve PV'ye göre farklı konumlarda geçirilerek soğutma işlemi yapmaktadır.



Şekil 3. Hava ile soğutmalı PV/T tasarımları [4].

Hava ile PV'lerin soğutulması işleminde avantajlar ve dezavantajlar bulunmaktadır. Soğutucu akışkanın donma ve kaynama riskinin olmaması, sızıntı olması durumunda zararının bulunmaması gibi özellikler PV'lerin soğutulmasında havanın kullanılmasının avantajları arasında yer almaktadır. Fakat düşük ısı kapasitesi ve düşük ısı iletkenliği ise havanın soğutucu olarak kullanılmasının dezavantajlarından biridir. Aşağıda literatürde soğutucu akışkan olarak havanın kullanıldığı PV/T sistemlere örnekler verilmektedir.

a) Sopian vd. [5] 1996 yılında yapmış oldukları bu çalışmada tek geçişli ve iki geçişli fotovoltaik termal kolektörlerin analizini teorik olarak gerçekleştirmişlerdir. Kolektörden geçen soğutucu akışkan olarak hava kullanılmıştır. Tek geçişli ve iki geçişli PV/T güneş kolektörlerin performansları absorber plakanın sıcaklığı, soğutucu akışkanın kütleli debisi, kanal derinliği, kolektör uzunluğu, soğutucu akışkanın giriş sıcaklığı ve güneş radyasyonu parametrelerinden etkilenmektedir. Çalışmada farklı değerlerdeki soğutucu akışkanın kütleli debisi, kolektör uzunluğu, kanal derinliği için analizler gerçekleştirilmiş ve bu parametrelerin değişiminin tek geçişli ve iki geçişli PV/T kolektörlerin performansına etkileri araştırılmıştır. Çalışmanın sonuç kısmında 1 m ve 2 m uzunluğundaki PV/T kolektörler için soğutucu

akışkan havanın çıkış sıcaklıkları incelenmiş ve aynı çalışma koşullarındaki havanın çıkış sıcaklığı 1 m uzunluğundaki tek geçişli ve iki geçişli PV/T kolektör için sırasıyla 44°C ve 47°C olarak bulunmuştur. 2 m uzunluğunda aynı çalışma koşullarındaki PV/T kolektörler için ise soğutucu akışkan havanın çıkış sıcaklığı tek geçişli ve iki geçişli kolektörler için sırasıyla 48°C ve 55°C olarak bulunmuştur. Aynı kolektör uzunlukları için soğutucu akışkanın kütleli debisinin artırılması ise PV'nin elektriksel verimini arttırdığı sonucunu göstermiştir. Yapılan çalışmada PV'nin elektriksel verimi 1 numaralı formülde gösterildiği şekilde sıcaklığa bağlı olarak hesaplanmıştır.

$$\eta_E = \eta_{ref}[1 - \beta_{ref}(T_m - T_r)] \quad (1)$$

Burada  $\eta_E$ , PV'nin elektriksel verimi,  $\eta_{ref}$  ise referans verimi göstermektedir. 25°C'de referans sıcaklıkta  $\eta_{ref}$  %10'dur.  $T_m$  ortalama absorber sıcaklığı ve  $T_r$ 'de referans sıcaklık olmak üzere  $\beta_{ref}$  2 numaralı formülde gösterildiği şekilde hesaplanmıştır.

$$\beta_{ref} = \frac{1}{T_{PV} - T_r} \quad (2)$$

2 numaralı formülde gösterilen  $T_{PV}$  fotovoltaik pil sıcaklığıdır. Sistemin termal verimi ise 3 numaralı formülde gösterildiği şekilde hesaplanmıştır.

$$\eta_T = \frac{\int \dot{m}_h C_{p_h} (T_{h,c} - T_{h,e}) dt}{A_{kol} \int G dt} \quad (3)$$

3 numaralı formülde gösterilen  $\dot{m}_h$  havanın kütle debisi,  $C_{p_h}$  havanın ortalama sıcaklıktaki özgül ısı değeri,  $T_{h,c}$  havanın çıkış sıcaklığı,  $T_{h,e}$  havanın giriş sıcaklığı,  $A_{kol}$  kolektörün toplam alanı ve G ise kolektör üzerine gelen güneş radyasyonudur. Sistem toplam verimliliğinin hesaplanması 4 numaralı formülde gösterildiği gibidir.

$$\eta_{PV/T} = \frac{\int \dot{m}_h C_{p_h} (T_{h,c} - T_{h,e}) dt + \int Q_E dt}{A_{kol} \int G dt} \quad (4)$$

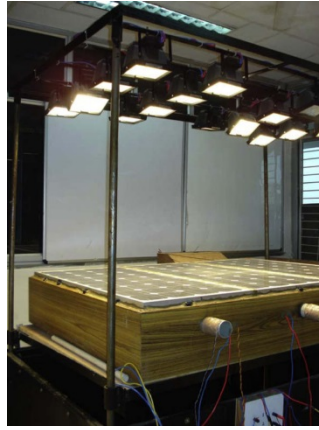
4 numaralı formülde gösterilen  $Q_E$  PV'den elde edilen elektrik enerjisidir. Kolektör uzunluğu 1 m ve soğutucu akışkanın kütleli debisinin 200-300 kg/h olduğu durumda tek geçişli kolektör için termal, elektriksel ve sistem toplam verimliliği sırasıyla %24-%28, %6-%7 ve %30-%35 olduğu bulunmuştur. Aynı çalışma koşullarındaki iki geçişli kolektör için ise termal, elektriksel ve sistem toplam verimliliği sırasıyla %32-%34, %8-%9 ve %40-%45'tir. Sonuçlar göstermiştir ki iki geçişli PV/T kolektör tek geçişli olanına göre daha iyi performans sergilemektedir.

b) Solanki vd. [6] 2009 yılında yapmış oldukları çalışmalarında PV/T güneş kolektörü sistemini tasarlayıp, imal edip, farklı çalışma koşullarındaki performansını test etmişlerdir. Araştırılan PV/T'de PV'lerin soğutulması için kullanılan akışkan havadır. Deney düzeneğinde 3 adet PV modülü kullanılmıştır. Toplamda birbirine seri bağlı 36 adet mono kristal silisyum güneş pillerinden oluşan sistemde PV'lerin soğutulması için kullanılan hava PV modüllerin altından geçirilmektedir. Şekil 4'de PV modüllerin konulmadan önce kanalların durumu görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere hava kanallar arasında seri olarak dolaşmakta ve birinci kanaldan geçtikten sonra ikinci kanala gelmekte ve en sonunda üçüncü kanaldan geçtikten sonra PV'leri soğutmuş ve ısınmış olarak çıkmaktadır.



**Şekil 4.** Solanki vd. tarafından tasarlanmış deney düzeneğinde PV modülü monte edilmeden önce kanal geçişlerinin fotoğrafı [6].

Deneyler iç ortam koşullarında gerçekleştirilmiş ve güneş ışınlarının simüle edilmesi için güneş simülatörü kullanılmıştır. Şekil 5'de görülen deney düzeneği ile gerçekleştirilen deneyler esnasında havanın giriş sıcaklığı, havanın her bir kanaldan çıkış sıcaklığı, oda sıcaklığı, güneş pillerinin sıcaklığı, hava hızı ve güneş radyasyonu parametrelerinin hepsi ölçülmüştür.



**Şekil 5.** Solanki vd. tarafından tasarlanan güneş simülatörlü PV/T test düzeneği [6].

Yapılan çalışma kapsamında PV modülün elektriksel verimliliği ( $\eta_E$ ) 5 numaralı formül ile hesaplanmıştır.

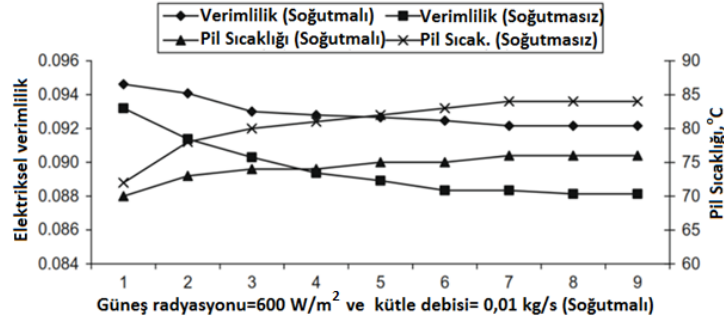
$$\eta_E = \eta_{ref} [1 - 0,0045(T_{PV} - T_a)] \quad (5)$$

Bu formülde gösterilen  $T_{PV}$  fotovoltaik pil sıcaklığı,  $T_a$  ise çevre sıcaklığıdır. Termal verim ise 6 numaralı formülde belirtildiği şekilde hesaplanmıştır.

$$\eta_T = \frac{\dot{Q}_u}{A_{kol}G} \quad (6)$$

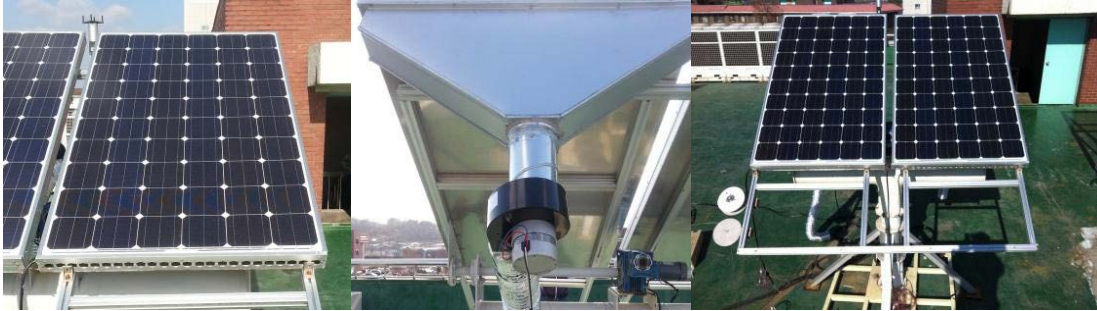
Yukarıdaki formülde belirtilen  $\dot{Q}_u$  kolektörden elde edilen yararlı ısıdır. Yapılan ölçümler neticesinde  $600 \text{ W/m}^2$  güneş radyasyonunun ve hava debisinin  $0,01 \text{ kg/s}$  olduğu durumda havanın bir, iki ve üçüncü kanaldan çıkış sıcaklığı sırasıyla  $62^\circ\text{C}$ ,  $72^\circ\text{C}$  ve  $81^\circ\text{C}$  olduğu görülmüştür. Kanal sayısının artırılmasıyla havanın sıcaklığı giderek artmakta ve buna bağlı olarak da havanın ısıyı çekme özelliği düştüğünden PV panellerin çalışma sıcaklığı yükselmektedir. PV panellerin çalışma sıcaklığının yükselmesi ise elektriksel verimlerinin düşmesine neden olmaktadır. Deneyler esnasında havanın kütleli debisi  $0,01 \text{ kg/s}$ ,  $0,05 \text{ kg/s}$ ,  $0,1 \text{ kg/s}$ ,  $0,15 \text{ kg/s}$  ve güneş radyasyonu  $400 \text{ W/m}^2$ ,  $600 \text{ W/m}^2$ ,  $700 \text{ W/m}^2$ , ve  $900 \text{ W/m}^2$  olarak değiştirilmiştir. Havanın giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın havanın kütleli debisi arttıkça azaldığı görülmüştür. Ayrıca yapılan deneyler sonucunda PV/T sistemin termal, elektriksel ve toplam verimliliği sırasıyla %42, %8,4 ve %50 olduğu bulunmuştur.

Bunlara ek olarak sistemde hava ile soğutma yapıldığı ve yapılmadığı durumlar arasındaki fark incelenmiş ve şekil 6'da gösterilmiştir. Bu şekilde gösterilen X eksenini, gözlemlerin 30'ar dakikalık zaman aralıklarını göstermektedir. Şekilden de görüleceği üzere soğutma yapılmadığı durumda soğutma yapıldığı duruma göre PV sıcaklıkları daha fazla yükselmekte ve PV verimleri de daha fazla düşmektedir.



Şekil 6. Elektriksel verimliliğin ve pil sıcaklığının soğutmalı ve soğutmasız duruma göre değişimi [6].

c) Kim vd. [7] 2014 yılında yapmış oldukları çalışmalarında monokristal PV modülüne sahip PV/T kolektörün deneysel araştırmasını yapmışlardır. PV/T kolektörde PV'lerin soğutulması için soğutucu akışkan olarak hava kullanılmıştır. Deney düzeneği güneşe doğru ve 35° açı ile kurulmuş olarak şekil 7'de görülmektedir. Monokristal malzemeden olan PV'lerin toplam alanı 1,6 m<sup>2</sup>'dir.



Şekil 7. Kim vd. tarafından tasarlanan deney düzeneği [7].

Deneyler süresince PV/T'den geçen havanın hacimsel debisi 240 m<sup>3</sup>/h olarak sabit tutulmuştur. Yapılan çalışmada sistemin termal verimliliği 7 numaralı formülden verildiği şekilde hesaplanmıştır.

$$\eta_T = \frac{\dot{m}_h C_{p,h} (T_{h,c} - T_{h,e})}{A_{kol} G} \quad (7)$$

Elektriksel verimliliğin hesaplanması ise 8 numaralı formülden belirtilmiştir.

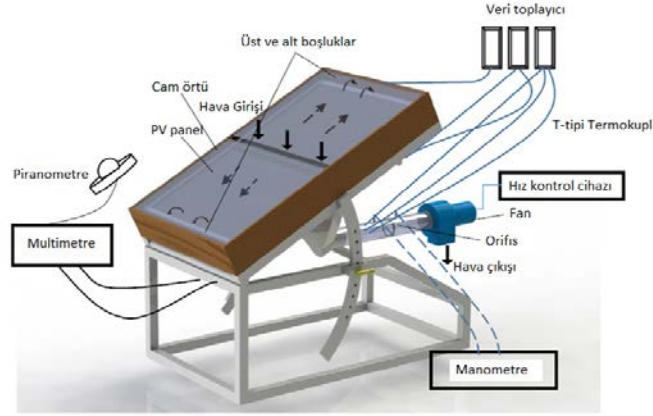
$$\eta_E = \frac{I_m V_m}{A_{pvt} G} \quad (8)$$

Burada  $I_m$  ve  $V_m$  sırasıyla maksimum güç altında çalışan PV modülünün akımı ve voltajıdır. Sonuçlara bakıldığında ise ortalama termal ve elektriksel verimliliğin sırasıyla %22 ve %15 olduğu görülmektedir.

d) Saygin vd. [8] 2016 yılında yaptıkları çalışmada modifiye edilmiş fotovoltaiik/termal (PV/T) güneş kolektörünün deneysel analizini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada ki asıl amaç PV'lerin çalışma sıcaklığının düşürülmesi, elektriksel ve termal verimin artırılmasıdır. PV'lerin soğutulması için soğutucu akışkan olarak hava kullanılmıştır. Şekil 8'de ki deney düzeneğinin şematik resminden



görülebileceği üzere hava kolektöre bir fan aracılığı ile cam örtünün orta noktasında bulunan boşlukta içeri alınmakta panelin üstünden ve altından geçirilip soğutma sağlandıktan sonra kolektörün alt tarafında bulunan başka bir kanaldan tahliye edilmektedir.



**Şekil 8.** Saygin vd. tarafından tasarlanan deney düzeneğinin şematik resmi [8]

Deneyler gerçekleştirilirken PV panel ile cam örtü arasındaki mesafenin ve değişen havanın kütleli debisinin sistem performansı üzerine etkileri araştırılmıştır. PV panel ile cam örtü arasındaki mesafe 3 cm, 5 cm ve 7 cm olmak üzere üç farklı şekilde değiştirilmiş, havanın kütleli debisi ise 0,011 kg/s, 0,021 kg/s, 0,03 kg/s ve 0,037 kg/s olmak üzere dört farklı şekilde değiştirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca PV'lerin soğutma yapıldığı ve yapılmadığı durumlar karşılaştırılmış ve soğutmanın elektriksel verimliliğe olan etkisi gözlemlenmiştir. Deneyler Türkiye, İstanbul'da 2015 yazında saat 08:00 ila 17:00 arasında yapılmıştır. Deneyin yapıldığı tüm günler için ortalama güneş radyasyonu ve çevre sıcaklığı sırasıyla 660,6 W/m<sup>2</sup> ve 32,2°C olduğu görülmüştür. Bu çalışmada da PV/T kolektörün termal verimliliği 7 numaralı formülde gösterildiği şekilde hesaplanmıştır. Sistemin elektriksel verimi ise 9 numaralı formülden hesaplanmıştır.

$$\eta_E = \frac{P}{A_{kol}G} = \frac{I_{sc}V_{oc}FF}{A_{kol}G} \quad (9)$$

Burada P maksimum çalışma gücü,  $I_{sc}$  kısa devre akımı,  $V_{oc}$  açık devre gerilimi ve FF (fill factor) doldurma faktörüdür. Doldurma faktörü 0.75 olarak alınır. Toplam sistem verimliliği ise 10 numaralı formülden bulunur.

$$\eta_{PV/T} = \eta_T + \frac{\eta_E}{0,38} \quad (10)$$

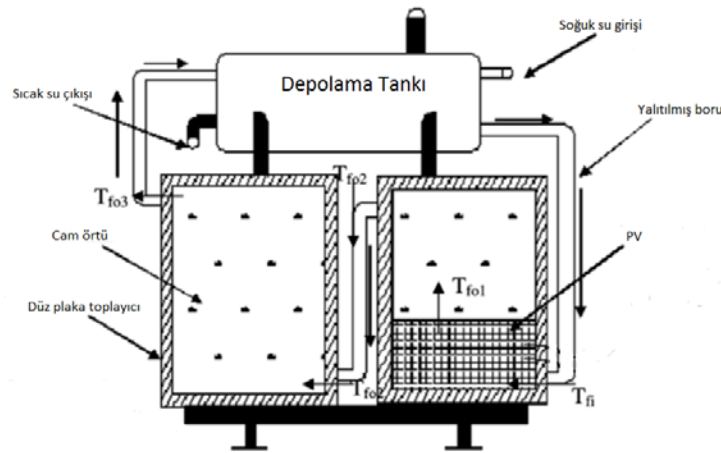
Sonuç kısmında en iyi termal verimliliğin PV/T kolektöründe cam örtü ile PV panel arasındaki mesafenin 3 cm olduğu durumda gerçekleştiği belirtilmiştir. En düşük verimliliğin ise panel ve cam örtü arasındaki mesafenin 5 cm olduğu durumda meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca soğutucu akışkan olarak kullanılan havanın hızının artırılmasının termal performansı da artırdığı belirtilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda maksimum termal verimliliğin cam örtü ve panel arasındaki mesafenin 3 cm ve havanın kütleli debisinin 0,037 kg/s olduğu durumda %48 civarında olduğu görülmüştür.



### 3. SU İLE SOĞUTMALI PV/T

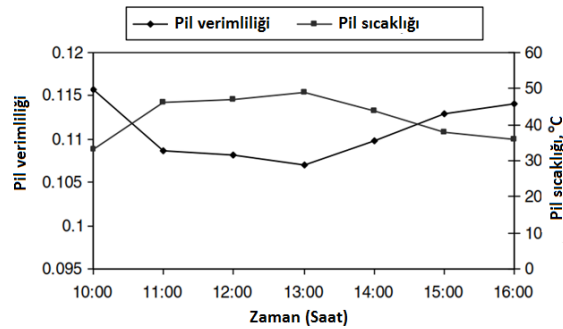
PV/T içerisinde soğutucu akışkan olarak suyun kullanıldığı sistemlerdir. Hava ile soğutmalı PV/T sistemlerinde soğutucu akışkan olarak kullanılan havanın yoğunluk, özgül ısı kapasitesi ve ısı iletkenlik gibi düşük termofiziksel özelliklere sahip olması PV/T'lerde soğutucu akışkan olarak havanın kullanımına olan ilginin giderek azalmasına yol açmıştır. Bunun yerine daha yüksek termal özelliklere sahip su soğutucu akışkan olarak PV/T sistemlerde denenmeye başlanmıştır. Literatürde bulunan su ile soğutmalı PV/T sistemlerine örnek olarak incelenen yayınlar şunlardır;

a) Dubey ve Tiwari [9] 2008 yılında yapmış oldukları çalışmada fotovoltaik/termal (PV/T) sistemin deneysel ve nümerik olarak incelemesini yapmışlardır. Yapılan bu çalışmada güneş enerjisinden hem elektrik hem de su ısıtılması yoluyla ısı enerjisi elde edilmesi amaçlanmıştır. Deneyler dış ortam koşullarında 2007 yılının şubat ve nisan ayları arasında gerçekleştirilmiştir. 9 numaralı şekilde deney düzeneğinin şematik resmi görülmektedir.



Şekil 9. Dubey ve Tiwari tarafından tasarlanan deney düzeneğinin şematik resmi [9].

Deney düzeneğinde görüldüğü üzere sistemde bulunan PV panellerden bir yandan elektrik üretilirken bir yandan da güneş kolektörlerinden su dolaştırılarak sıcak su elde edilmektedir. Sıcak su eldesi sırasında PV panellerin çalışma sıcaklığı da düşük tutularak verimleri artırılmaktadır. Şekil 10'da zamana bağlı olarak PV'lerin sıcaklığı ve verimliliği arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 10. PV'lerin zamana bağlı olarak sıcaklık ve verimlerinin değişimi [9].

Yapılan bu çalışmada da PV/T'nin termal verimi 6 numaralı formülde gösterildiği şekilde hesaplanmıştır. PV modülün sıcaklığa bağlı elektriksel verimi ise 11 numaralı formül ile belirlenmiştir.

$$\eta_E = \eta_{ref} [1 - 0,0045(T_{PV} - 25)] \quad (11)$$

Burada  $T_{PV}$  °C biriminde fotovoltaik pil sıcaklığıdır. Yapılan analizler sonucunda teorik olarak yapılan hesaplamaların deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Üç farklı durum için teorik analiz gerçekleştirilmiştir. Bunlardan birincisi absorberin tamamen fotovoltaik (PV) ile kaplandığı durum, ikincisi absorberin %50'sinin PV ile kaplandığı durum, üçüncüsü ise absorberin % 30,56'sinin PV ile kaplandığı durumdur. Sonuçlar göstermiştir ki PV/T düz plakalı kolektörün kısmi olarak PV modülleri ile kaplanması ısı ve ortalama pil verim değerlerini arttırmıştır.

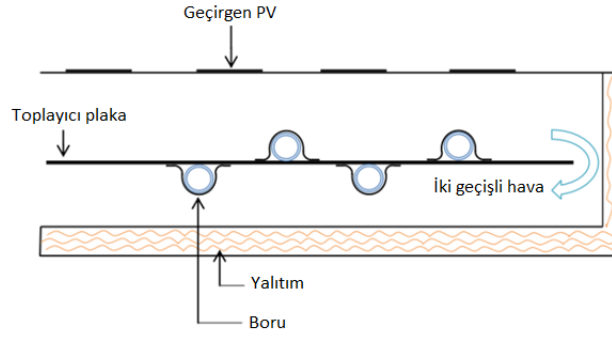
b) Kabul ve Duran [10] 2014 yılında yapmış oldukları çalışmada soğutucu akışkan olarak suyun kullanıldığı bir PV/T sistemini incelemişlerdir. Çalışmada ki esas amaç PV panellerin yüzey sıcaklığını düşük mertebelerde tutarak elektriksel verimlerinde oluşabilecek kayıpların önüne geçmek ve sistemden sıcak su temin etmektir. Çalışma içerisinde soğutmanın yapıldığı ve yapılmadığı durum arasındaki farkın görülebilmesi için iki ayrı panel kullanılmıştır. Panellerden birinde soğutma yapılmış diğerinde ise soğutma yapılmamıştır. Paneller 870x1640x105 mm boyutlarında mono kristal malzemeden yapılmış ve 72 hücre sayısına sahiptir. Soğutma yapılacak olan panelde ki suyun debisi 0,16 kg/s ve 0,33 kg/s olmak üzere iki ayrı değerde alınmıştır. Ayrıca panel açıları da 37° ve 33° olmak üzere iki şekilde değiştirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda sistemin termal ve elektriksel verimi sırasıyla 12 ve 13 numaralı formüllerden hesaplanmıştır.

$$\eta_T = \frac{\dot{m}_s C_{P_s} (T_{s,c} - T_{s,e})}{A_{kol} G} \quad (12)$$

$$\eta_E = \frac{VI}{A_{kol} G} = \frac{Q_e}{A_{kol} G} \quad (13)$$

Burada V ve I sırasıyla PV'den elde edilen gerilim ve akım değerleri,  $Q_e$  ise PV'den elde edilen elektriksel güçtür. Deneyler Türkiye'de Isparta ilinde temmuz ayının farklı günlerinde saat 09:00 ila 17:00 arasında gerçekleştirilmiştir. Sıcaklığın 39,9°C olduğu bir günde soğutma yapılmayan panelin yüzey sıcaklığı 95,1°C iken soğutma yapılan panelin yüzey sıcaklığının 53,5°C olduğu görülmüştür. Panel eğim açısının 37° ve su debisinin 0,33 kg/s olduğu durumda yapılan ölçümlerde su soğutmalı panelde ulaşılan maksimum güç soğutma yapılmayan paneldekine göre %31'lik bir artış göstermiştir. Panel açısının 37°'de sabit tutulması ve su debisinin 0,16 kg/s'ye düşürülmesi ile yapılan ölçümlerde su soğutmalı panelde ulaşılan maksimum güç soğutma yapılmayan paneldekine göre %28'lik bir artış sağlamıştır. Soğutma suyu debisinin düşürülmesi panel yüzey sıcaklığının yükselmesine ve elektriksel veriminde düşüşüne yol açmıştır. Su debisinin 0,33 kg/s'de sabit tutulduğu ve panel açısının 37°'den 33°'ye düşürüldüğü durumda yapılan ölçümlerde sistemin güç üretiminde %5,1'lik bir artış sağlandığı görülmüştür. Sonuç olarak soğutma yapıldığı durumda panellerin yüzey sıcaklığının düşürüldüğü elektriksel veriminin yükseltildiği ve güç üretiminin yaklaşık olarak %30 oranında artırıldığı görülmüştür.

c) Othman vd. [11] 2016 yılında yapmış oldukları bu çalışmada geleneksel fotovoltaik/termal (PV/T) kolektörü incelemişlerdir. İncelenen PV/T kolektörün üretilmiş olan yapısına bağlı olarak, bu kolektörden hem elektrik üretilmekte ve hem de hava ve su ısıtılması yapılmaktadır. Şekil 11'de görülen sistemin en üst katmanında geçirgen bir PV tabakası alt kısmında üzerinde su boruları bulunan bir kolektör plakası vardır. En alt kısım ve sistemin yan tarafları da izolasyon malzemesiyle yalıtılmıştır. Sistem içerisinde hava 2 geçişli su ise bir geçişli olarak dolaşmaktadır. Kolektör plakasının üst kısmına beş, alt kısmına ise dört bakır su borusu yerleştirilmiştir.



**Şekil 11.** Othman vd. tarafından tasarlanan su ve hava soğutmalı PV/T kolektörün kesit alanı [11].

Hem elektrik üretmeye yarayan hem de hava ve suyu ısıtan bu sistemin deneyleri laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde güneş simülatörü ile paneller üzerine gönderilen güneş ışınım değeri 350; 500; 650 ve 800 W/m<sup>2</sup> olarak değiştirilmiştir. Ayrıca Suyun kütleli debisi 0,02; 0,04; 0,06; 0,08 ve 0,1 kg/s, havanın kütleli debisi ise 0,01; 0,02; 0,03; 0,05 ve 0,07 kg/s olarak değiştirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda sistemin elektriksel verimi 13 numaralı formül ile gösterildiği şekilde ve sistemin termal verimliliği ise 14 numaralı formül ile gösterildiği şekilde hesaplanmıştır.

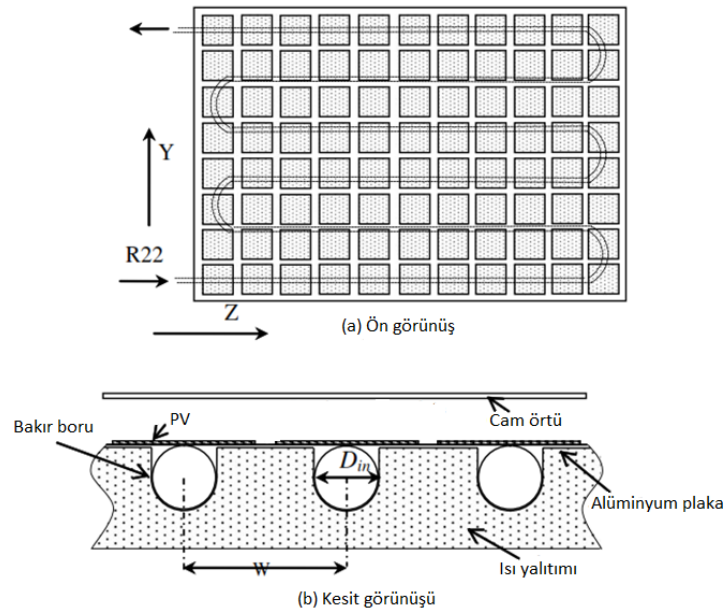
$$\eta_T = \frac{Q_{U(su)} + Q_{U(hava)}}{A_{kol}G} \quad (14)$$

Burada  $Q_{U(su)}$  ve  $Q_{U(hava)}$  sırasıyla su ve havadan elde edilen yararlı enerjidir. Çalışmanın sonuç kısmında değişen güneş radyasyon oranına bağlı olarak, toplam faydalı gücün, toplam ısıl verimin ve elektriksel verimin nasıl değiştiği incelenmiştir. Ayrıca hava ve suyun kütleli debileri değiştirilerek, yapılan bu değişimin yararlı enerjiye, termal verime, havanın ve suyun giriş ve çıkış sıcaklıklarına etkisi gözlemlenmiştir. Çalışmada hesaplanan en yüksek elektriksel verim %17, termal verim %76 ve ortalama elektriksel güç 145 W'tır.

#### 4. ISI POMPALI PV/T

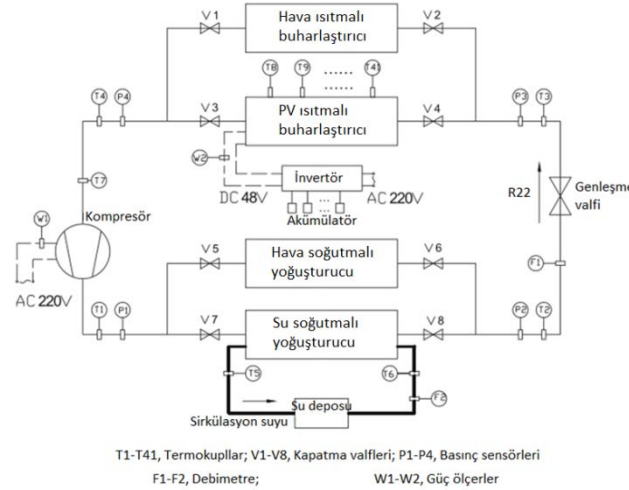
PV/T içerisinde soğutucu akışkan olarak suyun kullanıldığı sistemlerde suyun giderek ısınması ve PV/T'nin çalışma sıcaklığını yükseltmesi, ayrıca soğuk iklimlerde suyun donma tehlikesi gibi dezavantajlar bulunması farklı soğutucu akışkanların PV/T sistemlerinde kullanılmasına yol açmıştır. Farklı soğutucu akışkanların kullanılması içinde ısı pompalı PV/T (IP-PV/T) sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemlerde kullanılan farklı soğutucu akışkanlar sayesinde soğuk iklimlerde meydana gelebilecek donma tehlikesinin önüne geçilebilmekte ve PV'lerin çalışma sıcaklıklarının düşük mertebelerde tutulması sağlanmaktadır. Aşağıda literatürde bulunan IP-PV/T'li sistemlere bazı örnekler verilmiştir.

a) Ji vd. [12] 2009 yılında yaptıkları bu çalışmada yeni bir fotovoltaik/termal (PV/T) güneş enerjisi destekli bir ısı pompası sistemini tanımlamışlardır. Bu sistemden hem elektrik hem de ısı enerjisi elde etmeyi amaçlamışlardır. Şekil 12'de sistemde evaporatör olarak kullanılan PV'nin şematik gösterimi görülmektedir. Şematik olarak görülen PV'nin toplam kolektör alanı 5,49 m<sup>2</sup> ve PV pillerinin alanı ise 4,59 m<sup>2</sup>'dir.



Şekil 12. Ji vd. tarafından tasarlanan PV evaporatörün şematik gösterimi [12].

PV ünitesinin ısı pompasının evaporatörü olarak kullanılmasıyla beraber, bu sistemden hem elektrik hem de ısı enerjisi elde edilmiştir. Sistemde soğutucu akışkan olarak R22 kullanılmıştır. Tanımlanan sistemin hem deneysel hem de nümerik çalışması yapılmış ve yapılan bu deneysel ve nümerik çalışmanın sonuçları kıyaslanmıştır. Sistemin nümerik simülasyonu C++ dilinde yazılmıştır. Sistemin deney düzeneği 13 numaralı şekilde görülmektedir.



Şekil 13. Ji vd. tarafından tasarlanan deney düzeneğinin şematik resmi [12].

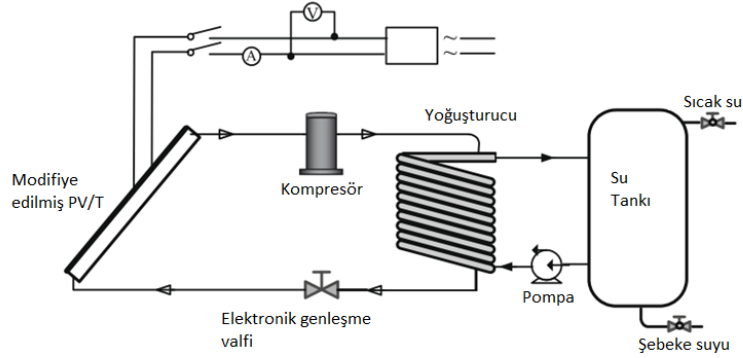
Yapılan bu çalışmada da PV/T sisteminin toplam verimliliği 10 numaralı formülde gösterildiği şekilde hesaplanmıştır. Sistemin elektriksel verimliliği ise 15 numaralı formülden bulunmuştur.

$$\eta_E = \tau_{eva} \eta_{ref} [1 - 0,0045(T_{PV} - 298,15)] \quad (15)$$

Burada  $\tau_{eva}$  geçirgenlik katsayısı ve  $T_{PV}$  ise K biriminde PV'nin sıcaklığıdır. Deneysel çalışmadan ve simülasyon çalışmasından elde edilen sonuçların kıyaslanması neticesinde deneysel ve nümerik çalışmanın yaklaşık olarak aynı sonuçları (ısı kazancı, elektrik üretimi, PV verimliliği gibi) verdiği

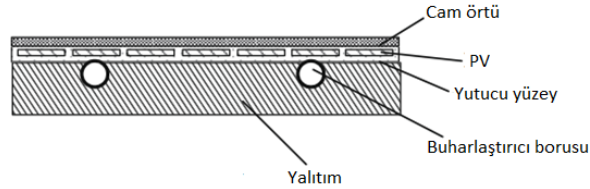
görülmüştür. Bu sistemin PV verim performansının diğer PV/T sistemlerine göre daha büyük ve %12'den fazla olduğu saptanmıştır.

b) Xu vd. [13] 2009 yılında yapmış oldukları bu çalışmalarında yeni bir IP-PV/T sistemini teorik olarak incelemişlerdir. Şekil 14'den de görüleceği üzere bu sistemde PV/T ısı pompası sisteminin buharlaştırıcısı konumundadır. Bu sistemle birlikte hem elektrik üretimi, hem de hacim ısıtma ve kullanım için sıcak su elde edilmesi amaçlanmıştır.



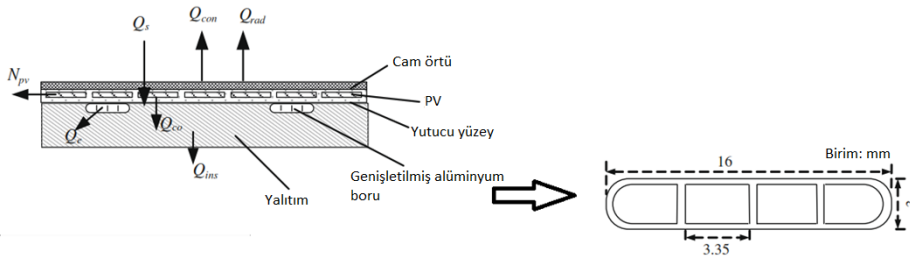
Şekil 14. Xu vd. tarafından tasarlanan ısı pompalı PV/T sisteminin şematik resmi [13].

Geleneksel IP-PV/T sistemlerinde ısı pompası sisteminin buharlaştırıcısı konumunda olan PV/T'lerin yapısı benzerdir. Bakır veya alüminyumdan yapılan absorbere yapıştırılmış olan yuvarlak bakır borulardan oluşan geleneksel PV/T'nin şematik resmi şekil 15'de görülmektedir.



Şekil 15. Geleneksel ısı pompalı PV/T'li sistemlerde buharlaştırıcı konumundaki PV/T [13].

Xu vd. yaptıkları bu çalışmalarında ısı pompasının buharlaştırıcısı konumunda olan PV/T sistemini modifiye ederek yeni bir PV/T meydana getirmişlerdir. Modifiye edilmiş PV/T'nin yapısı 16 numaralı şekilde görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere absorbere yapışık halde bulunan borular, alüminyumdan yapılmış olup genişletilmiş yassı biçimindeki borular haline getirilmiştir.



Şekil 16. Xu vd. tarafından tasarlanan ısı pompalı PV/T'li sistemlerde buharlaştırıcı konumundaki modifiye edilmiş PV/T [13].

Üzerinde çalışılan ısı pompalı PV/T sisteminde kolektörün yüzey alanı 2,25 m<sup>2</sup>, PV'nin alanı ise 1,91 m<sup>2</sup>'dir. Isı pompası içerisinde çalışma akışkanı olarak R22 kullanılmıştır. Sistemde kullanılan su tankı 150 L kapasitesinde olup yoğuşturucuda atılan ısı ile içerisindeki suyun ısınmasını sağlanmaktadır. Isı pompası sisteminde farklı devirlerde çalışabilen kompresör kullanılmış ve sonuç kısmında da değişen devir sayısına bağlı olarak sistem performansının nasıl değiştiği araştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda PV'nin elektriksel verimi 16 numaralı formülden belirlenmiştir.

$$\eta_E = \eta_{ref} [1 - C_T(t_p - 25)] \quad (16)$$

Burada  $\eta_{ref}$  standart koşullar (  $G=1000 \text{ W/m}^2$  ,  $t_p=25 \text{ }^\circ\text{C}$  ) altındaki fotovoltaiik hücrelerinin elektriksel verimi,  $C_T$  PV hücrelerinin sıcaklık katsayısı,  $t_p$  ise PV panellerin  $^\circ\text{C}$  birimindeki sıcaklığıdır. Modifiye edilmiş PV/T'nin termal verimi ise 17 numaralı formülden bulunmuştur.

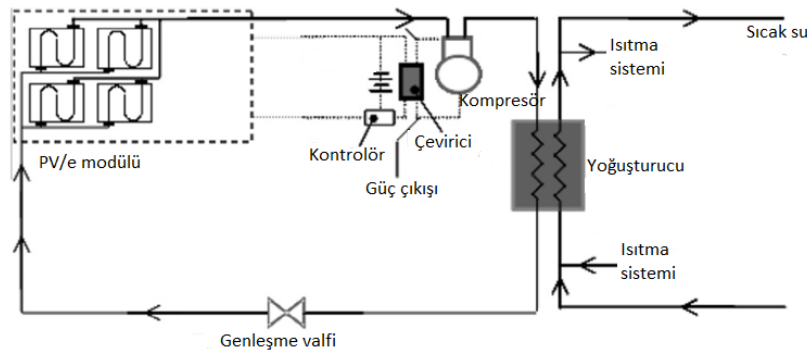
$$\eta_T = \frac{Q_{co}}{A_{kol}G} \quad (17)$$

Burada  $Q_{co}$  IP-PV/T sisteminde soğutucu akışkanın buharlaştırıcı konumundaki PV/T'den elde ettiği ısı miktarı,  $G$  ise kolektör yüzeyinde birim alana gelen güneş radyasyonudur. IP-PV/T sisteminin  $COP_{sys}$  değeri ise 18 numaralı formülden hesaplanmıştır.

$$COP_{sys} = \frac{Q_c}{(N_{komp} + N_p)} \quad (18)$$

Burada  $Q_c$  yoğuşturucuda suya verilen ısı miktarı,  $N_{komp}$  ve  $N_p$  ise sırasıyla kompresörde ve pompada tüketilen güç miktarıdır. Sonuçlar göstermiştir ki aynı koşullarda çalışan geleneksel ve modifiye edilmiş ısı pompalı PV/T sistemlerinin karşılaştırması yapıldığında modifiye edilmiş PV/T'nin kullanıldığı sistemlerin  $COP_{sys}$  değerinin %7, termal veriminin %6 ve elektriksel veriminin %2 daha fazla olduğu görülmüştür.

c) Zhao vd. [14] 2011 yılında yapmış oldukları bu çalışmada ısı pompası ile birlikte çalışan çatı tipi bir PV/e (fotovoltaiik/evaporatör) sisteminin tasarımını yapmışlar ve bu sistemin teorik analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu sistem sayesinde bina için hem elektrik üretilirken hem de ısı pompası sayesinde ısı enerjisi üretilmektedir. Sistemin şematik resmi şekil 17'de görülmektedir. Bu şematik resimden de görüleceği üzere PV/e modülü ısı pompası sisteminin evaporatörü konumundadır. Isı pompasında bulunan diğer bileşenler ise kompresör, genişleme vanası ve yoğuşturucudur. Isı pompasında kullanılan soğutucu akışkan R134a olup ısı pompasının kapasitesi 5 kW'tır.



Şekil 17. Zhao vd. tarafından tasarlanan sistemin şematik resmi [14].

Yapılan analizlerde ısı pompasının evaporatörünün 10 $^\circ\text{C}$ , kondenserinin 60 $^\circ\text{C}$  sıcaklıklarında çalıştığı belirtilmiştir. Çalışma sonucunda ısı pompası tabanlı PV/e modülünün ısı ve elektriksel veriminin önemli ölçüde geliştirildiği görülmüştür. Çalışmada sistemin termal, elektriksel ve toplam verimliliği sırasıyla 19, 20 ve 21 numaralı formüller ile hesaplanmıştır.



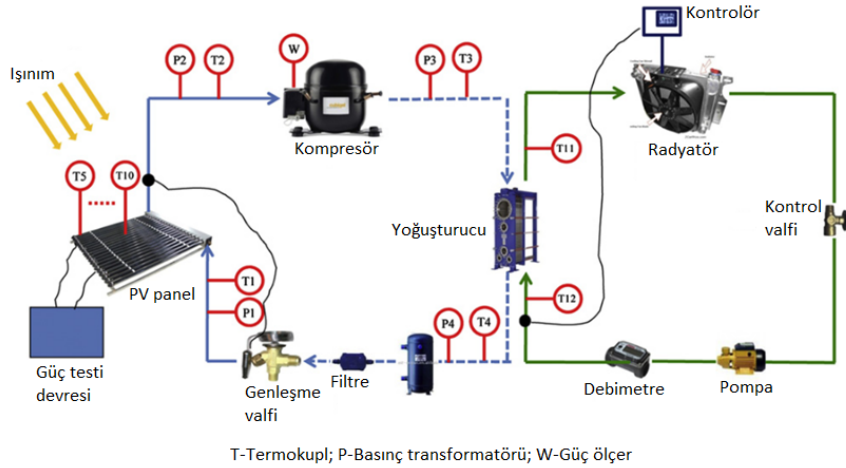
$$\eta_T = \frac{Q_{t,net}}{A_{kol}G} \quad (19)$$

$$\eta_E = \frac{Q_{e,net}}{A_{kol}G} \quad (20)$$

$$\eta_{PV/T} = \eta_T + \eta_E \quad (21)$$

Burada  $Q_{t,net}$  ve  $Q_{e,net}$  sırasıyla sistemden elde edilen net termal ve elektriksel enerjidir. Yapılan analizler neticesinde sistemin ortalama elektriksel veriminin %19,03, termal veriminin %55,58 ve sistem toplam verimliliğinin %70,14 olduğu görülmüştür. Ayrıca ısı pompası tabanlı PV/e sisteminin performansının fotovoltaik (PV) ve fotovoltaik/termal (PV/T) sistemlere göre daha fazla olduğu saptanmıştır.

d) Chen vd. [15] 2011 yılında yapmış oldukları bu çalışmalarında IP-PV/T sisteminin deneysel incelemesini yapmışlardır. Hem elektrik üretmek hem de sıcak su üretmek için tasarlanan bu hibrit sistem şekil 18'de görülmektedir. Isı pompası sistemi şekilden de görüleceği üzere 4 ana elemandan oluşmaktadır. Bunlar buharlaştırıcı konumundaki PV/T, kompresör, yoğuşturucu ve kısılma vanasıdır. Isı pompası içerisinde soğutucu akışkan olarak R134a kullanılmıştır.



Şekil 18. Chen vd. tarafından tasarlanan ısı pompalı PV/T sistemi [15].

Deneyler laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmiştir. Güneş radyasyonu bir simülasyon paneli kullanılarak simüle edilmiştir. Yapılan çalışma içerisinde PV'nin elektriksel verimi 22 numaralı formüle belirtildiği şekilde hesaplanmıştır.

$$\eta_E = \frac{Q_e}{A_{kol}(\beta\tau)_{kol}G} \quad (22)$$

Burada belirtilen  $Q_e$  PV/T'den elde edilen elektrik enerjisi,  $(\beta\tau)_{kol}$  ise PV'lerin efektif absorplama katsayısıdır. Isı pompası sisteminin  $COP_{IP}$  değeri ise 23 numaralı formülden hesaplanmıştır.

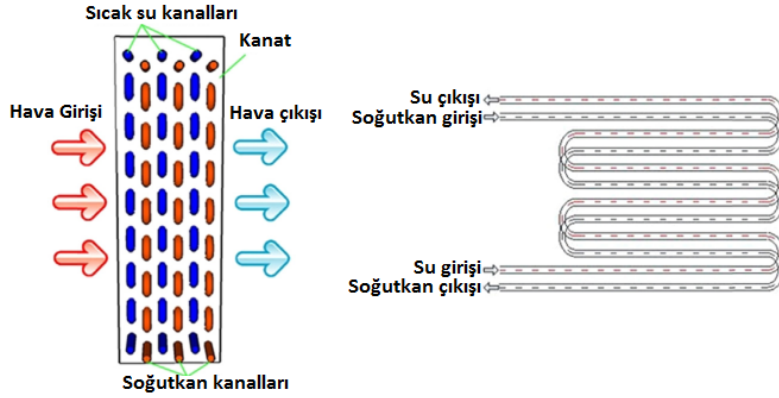
$$COP_{IP} = \frac{Q_c}{(N_{komp})} \quad (23)$$

Deneylerde üç farklı durumun sistem performansına etkisi incelenmiştir. Bunlardan birincisi güneş radyasyon miktarının değişimidir. Yoğuşturucu su debisinin 2 L/dak ve yoğuşturucuya tedarik edilen su sıcaklığının 35°C olduğu durumda radyasyon miktarının 200 W/m<sup>2</sup>'den 800 W/m<sup>2</sup>'ye yükseltilmesi ısı pompası sisteminin  $COP_{IP}$  değerini 2,9'dan 4,6'ya yükseltmiştir. Ayrıca radyasyon oranının artırılmasıyla PV'den elde edilen elektriksel güç ve PV'nin elektriksel verimi de artış göstermiştir. İkinci



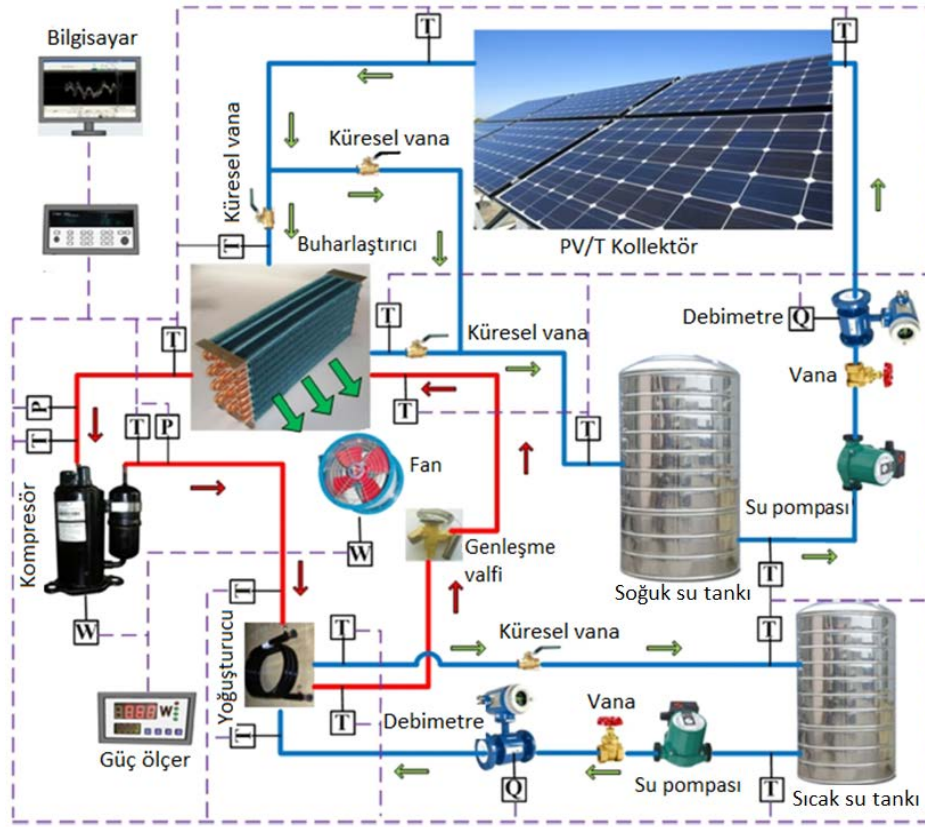
olarak sistem performansına etkisi incelenen parametre yoğuşturucuya sağlanan su sıcaklığıdır. Radyasyonun  $600 \text{ W/m}^2$ , yoğuşturucu su debisinin 2 L/dak debide sabit tutulması ile gerçekleştirilen deneylerde yoğuşturucuya sağlanan su sıcaklığının 25 C'den 45°C'ye çıkartılması ısı pompası sisteminin  $COP_{IP}$  değerinin 5,2'den 3,2'ye düşmesine neden olmuştur. Değişen yoğuşturucu su sıcaklığının PV'den elde edilen elektriksel güç ve PV'nin elektriksel verimine etkisi oldukça küçük olduğu saptanmıştır. Üçüncü ve son olarak sistem performansına olan etkisi incelenen parametre ise yoğuşturucu su debisidir. Radyasyonun  $600 \text{ W/m}^2$  ve yoğuşturucuya sağlanan su sıcaklığının 35°C olduğu durumda yapılan deneylerde yoğuşturucu su debisinin 1 L/dak'dan 5 L/dak'ya yükseltilmesi ısı pompası sisteminin  $COP_{IP}$  değerini 6,7'den 2,8'e düşürmüştür. Değişen yoğuşturucu su debisinin PV'den elde edilen elektriksel güç ve PV'nin elektriksel verimine etkisi oldukça küçük olduğu saptanmıştır.

e) Wang vd. [16] 2015 yılında yaptıkları bu çalışmada çift ısı kaynaklı kompozit buharlaştırıcıya sahip IP-PV/T sisteminin deneysel ve teorik analizini gerçekleştirmişlerdir. Kurulan sistem ile ısı pompası buharlaştırıcısında hem PV/T'den gelen sudan hem de çevre havadan ısı çekilmektedir. Şekil 19'da ısı pompasında kullanılan kompozit buharlaştırıcı görülmektedir. Kompozit buharlaştırıcıda su ve soğutkan karşıt akışlı, hava ise çapraz akışlı olarak ısı değiştiriciden geçmektedir.



Şekil 19. Wang vd. tarafından tasarlanan kompozit buharlaştırıcı [16].

Çift ısı kaynaklı kompozit buharlaştırıcıya sahip ısı pompalı PV/T sisteminin şematik resmi şekil 20'de görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere sistem ısı pompası, PV/T ve sıcak su sistemi olmak üzere üç bölüme ayrılmıştır. Isı pompası sistemi çalıştığı zaman soğutkan ilk olarak kompresöre girmekte, düşük basınç ve sıcaklıkta olan soğutkan kompresörde yüksek basınç ve sıcaklığa çıkartılmaktadır. Sonrasında yoğuşturucuya giren soğutkan ısıyı kullanım suyuna vererek yoğuşmaktadır. Yoğuşturucudan çıkan soğutulmuş soğutkan kısımla vanasına girerek yüksek basınçtan düşük basınca kısılıp düşük basınçta sıvı ve buhar karışımı formuna getirilmektedir. Sonrasında kompozit buharlaştırıcıya giren soğutkan çevre hava ve PV'lerden gelen ısınmış olan sudan ısı çekerek buharlaşmakta ve sonrasında tekrardan kompresöre girerek ısı pompası sistemindeki çevrimini tamamlamaktadır. PV/T sistemi çalıştığı zaman kolektörde bir yandan elektrik üretilirken bir yandan da düşük sıcaklıkta su üretilmektedir. Bu sıcak su PV'lerden çektiği ısıyı ısı pompasının buharlaştırıcısında soğutkanı verdikten sonra tekrardan kolektöre dönerek PV'lerin ısıyı çekip çevrimini tamamlamaktadır. Böylece PV'ler düşük sıcaklıkta çalışarak hem verimleri artırılmakta hem de güneşten gelen enerjiden ısı olarak da yararlanılmaktadır. Bu iki sistemin yanında sıcak su sistemi de çalıştırılarak soğutkanın yoğuşturucuda verdiği ısı kullanım suyu ile alınmakta ve yoğuşturucudan çıkan sıcak su tanka gönderilmektedir. Tank ile yoğuşturucu arasında çevrim gerçekleştiren kullanım suyu sayesinde yoğuşturucuda soğutkanın ısı çekilerek soğutkanın yoğuşması sağlanmakta ve kullanım için sıcak su elde edilmektedir.



**Şekil 20.** Wang vd. tarafından tasarlanan ısı pompalı PV/T sisteminin şematik resmi (T: Sıcaklık ölçüm yerleri, P: Basınç ölçüm yerleri, W: Güç ölçüm yerleri, Q: Debi ölçüm yerleri) [16].

Yapılan analizler iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birincisi PV/T sistemini bir elektrikli ısıtıcı ile simüle ederek yapılan analizdir. Bu simülasyon çalışmaları ile tek ısı kaynaklı ve çift ısı kaynaklı ısı pompası sisteminin karşılaştırılması yapılmıştır. Yapılan çalışmada kolektörün termal verimi 24 numaralı formülde gösterildiği şekilde hesaplanmıştır.

$$\eta_T = \frac{Q_{kol}}{A_{kol}G} \quad (24)$$

Burada  $Q_{kol}$  kolektörden elde edilen ısı enerjisidir. PV/T kolektörün elektriksel verimliliği ise 25 numaralı formülden hesaplanmıştır.

$$\eta_E = \frac{VI}{A_{pv}G} = \frac{Q_e}{A_{pv}G} \quad (25)$$

Burada V ve I sırasıyla PV'den elde edilen gerilim ve akım değerleridir.  $Q_e$  PV/T'den elde edilen elektrik enerjisi,  $A_{pv}$  ise kolektör üzerindeki PV'lerin toplam alanıdır. Sistemin  $COP_{sys}$  değeri ise 26 numaralı formülden hesaplanır.

$$COP_{sys} = \frac{Q_{kol} + Q_e / 0.38}{(N_{komp} + N_p + N_f)} \quad (26)$$

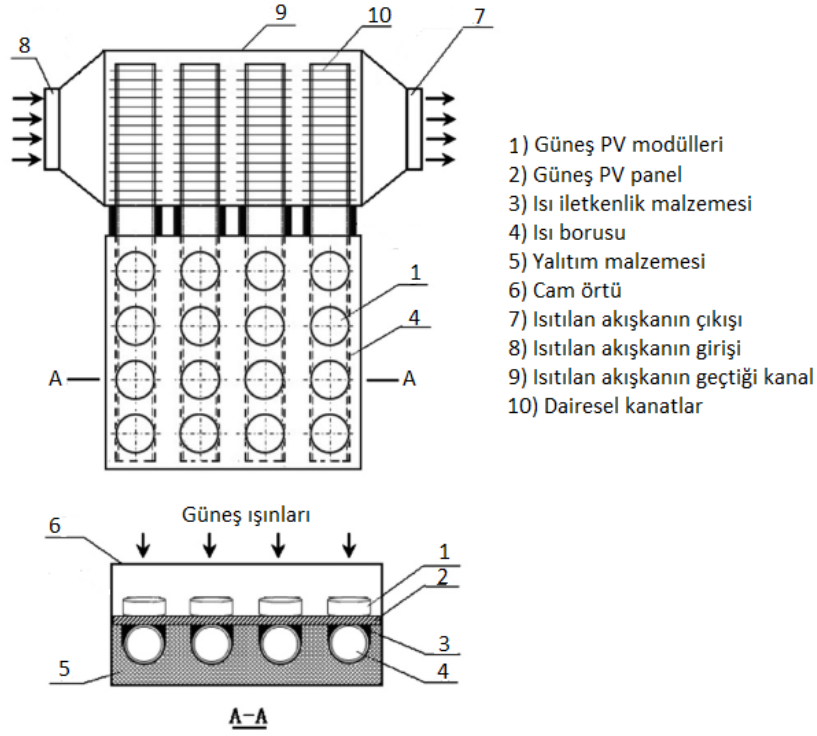
Formüle geçen  $N_{komp}$ ,  $N_p$  ve  $N_f$  ise sırasıyla kompresör, pompalar ve fan tarafından tüketilen güç miktarlarıdır. Aynı koşullar altında yapılan analizlerde çift ısı kaynaklı ve tek ısı kaynaklı çalışma modlarında sistemin  $COP_{sys}$  değeri ortalama olarak sırasıyla 2,49 ve 2,24 olarak bulunmuştur. Çift ısı kaynaklı çalışma modunda sistemin anlık ve ortalama performansının tek ısı kaynaklı çalışma moduna

göre daha iyi olduğu saptanmıştır. Bu sonuçlar göstermektedir ki çift ısı kaynaklı bir ısı pompasının kullanılması sistem performansı açısından daha uygundur. Simülasyon çalışmasından sonra deneysel çalışmaya geçilmiştir. Çift ısı kaynaklı kompozit buharlaştırıcıya sahip olan ısı pompalı PV/T sisteminin deneysel analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu sistemde kullanılan kolektördeki toplam toplayıcı alanı ve PV güç üretim alanı sırasıyla 2,56 m<sup>2</sup> ve 2,25 m<sup>2</sup>'dir. Isı pompası sisteminde kullanılan soğutucu akışkan R22'dir. Ayrıca deneyler süresince kompozit buharlaştırıcıya giren su ve havanın sıcaklıkları arasındaki farkın 5°C olacak şekilde kontrol altında tutulması sağlanmıştır. Yapılan deneysel çalışma PV/T'nin ortalama elektrik kazancının ve elektriksel veriminin sırasıyla 278 W ve %14,5 olduğu bulunmuştur. Bunun yanı sıra PV/T'nin ortalama termal kazancının ve veriminin sırasıyla 664 W ve %36 olduğu görülmüştür. Sistemin ortalama  $COP_{sys}$  değeri ve ekserji verimliliğine bakıldığında ise sırasıyla 4,08 ve 0,33 olduğu saptanmıştır.

## 5. ISI BORULU PV/T

IP-PV/T sistemlerinin kullanılması ile birlikte su ve hava ile soğutmalı PV/T'lerde oluşan dezavantajlar ortadan kaldırılmış olmasına rağmen bu sistemlerde de soğutucu akışkanın sızıntı yapma olasılığı gibi bir takım olumsuzluklar bulunmaktadır. Bu olumsuzlukların giderilmesi adına da son yıllarda ısı borulu PV/T (IB-PV/T) sistemler geliştirilmiştir. Bu sistemlerin kullanılarak PV/T içerisinde kullanılan soğutucu akışkanın sızıntı yapma olasılığı ortadan kaldırılmış ve yüksek ısı transfer kapasitelerine sahip akışkanların kullanılması ile PV'lerin çalışma sıcaklıkları düşük mertebelerde tutulmuştur. Ayrıca ısı boruları içerisinde farklı akışkanlar kullanılarak su ile soğutmalı sistemlerde meydana gelen donma riski de ortadan kaldırılmıştır. Aşağıda son yıllarda IB-PV/T sistemleri ile ilgili çalışmalara yer verilmiştir.

a) Wu vd. [17] 2011 yılında yaptıkları bu çalışmada IB-PV/T sistemin teorik araştırmasını yapmışlardır. Şekil 21'de teorik çalışması yapılan IB-PV/T sistemi görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere PV modüller güneş PV paneli üzerine dikdörtgen biçiminde yerleştirilmiştir. Güneş PV paneli altında ise PV modüllerin ısını çekmek için ısı borularının buharlaştırıcı kısmı yerleştirilmiştir. Isı borularının alt kısmında ise ısı kayıplarını önlemek adına yalıtım malzemesi kullanılmıştır. Isı borularının yoğunlaştırıcı kısmı ise ısıtılması düşünülen akışkanla temas edebileceği bir kanal içerisine yerleştirilmiştir. Yoğunlaştırıcıda ısı transferinin artırılması amacıyla da ısı boruları etrafında dairesel kanatçıklar kullanılmıştır. Güneş ışınları PV/T üzerine geldiği zaman ilk olarak cam yüzeyden geçerler. Bu ışınların bir kısmı PV modüller aracılığı ile soğurularak elektrik enerjisine dönüştürülür. Kalan kısmı ise güneş PV paneli ısıtmaya başlar. Bu panelde toplanan ısı altında bulunan ısı borularına iletim ile geçer. Isı boruları içerisindeki sıvı halde bulunan akışkan bu ısıyı alarak buharlaşır ve ısı borularının yoğunlaştırıcı kısmına doğru ilerler. Daha sonra yoğunlaştırıcı kısmına gelen buhar burada ısını dışarıdan gelen akışkana verir ve yoğunlaşarak sıvı forma geldikten sonra tekrardan ısı borularının evaporatör kısmına gelerek çevrimini tamamlar. Bu şekilde PV panelin sıcaklığı sürekli düşük mertebelerde tutularak hem PV modüllerin elektriksel verimlerinde oluşabilecek kayıpların önüne geçilir, hem de güneş PV panelinden alınan ısı ile dışarıdan gelecek bir akışkan ısıtılarak termal enerji elde edilir.



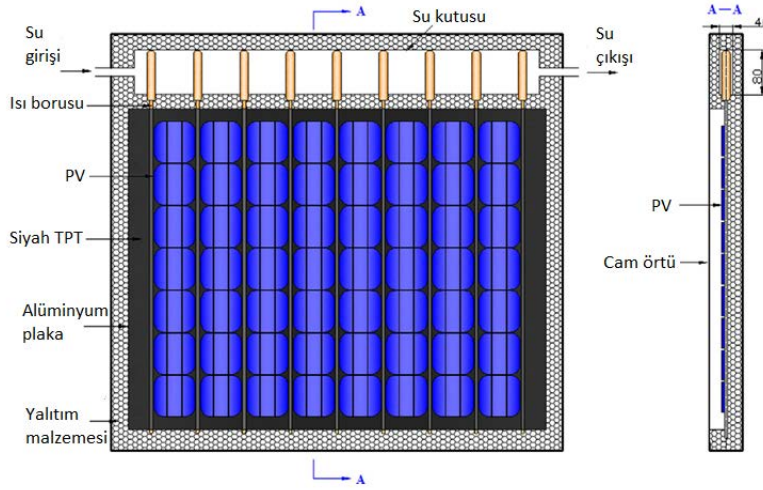
**Şekil 21.** Wu vd. tarafından tasarlanan ısı borulu fotovoltaik/termal (IB-PV/T) sistemi [17].

Bu çalışmada yapılan teorik çalışmanın doğruluğu, literatürde aynı yapıda ve işletme parametrelerinde yapılmış deneysel çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonrasında teorik ve deneysel çalışmaların birbiri ile uyumlu olduğu görülmüş ve bu teorik çalışma ile IB-PV/T sisteminin performans değerlendirmelerinin yapılabileceğine karar verilmiştir.

Çalışmada kullanılan ısı boruları bakırdan olup, kondenser üzerinden geçirilip ısı borularından transfer edilecek ısıyı alıp ısıtılan akışkan sudur. Çalışmanın sonuç kısmında ısıtılan akışkan suyun giriş sıcaklığının ve debisinin, PV modülleri sıcaklığı, thermal, elektriksel ve ekserji verimlilikleri üzerine etkisi gözlemlenmiştir. Yapılan çalışma içerisinde PV/T sisteminin elektriksel ve termal verimleri sırasıyla 13 ve 24 numaralı formüllerden hesaplanmıştır. Yapılan analizler neticesinde sistemin toplam termal, elektriksel ve ekserji verimliliği sırasıyla %63,65, %8,45 ve %10,26 olduğu bulunmuştur.

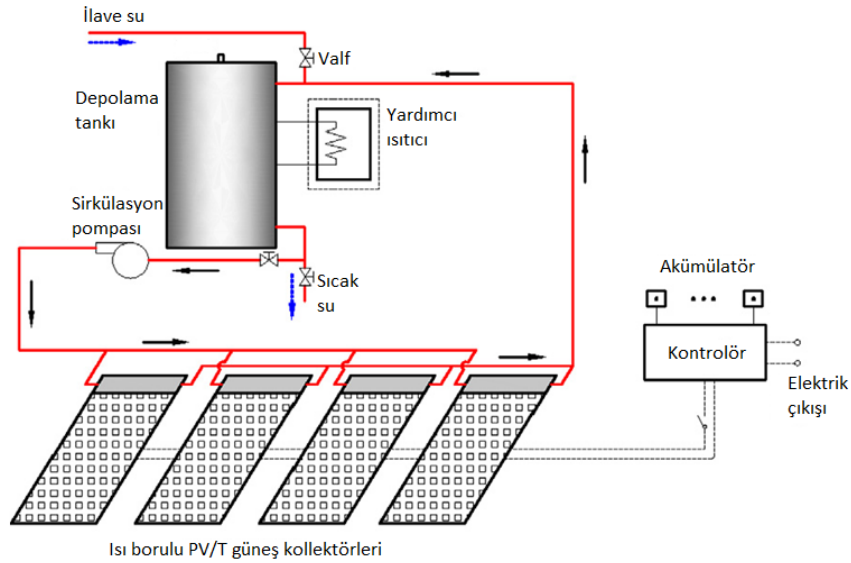
b) Gang vd. [18] 2012 yılında yapmış oldukları bu çalışmalarında ısı borulu fotovoltaik/termal (IB-PV/T) sisteminin simülasyon çalışmasını yapmışlardır. Simülasyon modeli kullanılarak Çin'de üç farklı kentte (Hong Kong, Lhasa, ve Beijing) yıllık elde edilen elektrik ve ısıl enerji miktarları belirlenmiştir. İki farklı IB-PV/T sistemi incelenmiştir. Birincisi yardımcı ısıtıcı ekipmana sahip IB-PV/T sistem diğeri ise yardımcı ısıtıcı ekipmana sahip olmayan IB-PV/T sistemdir.

22 numaralı şekilde IB-PV/T güneş kolektörünün yapısı görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere ısı borusunun buharlaştırıcı kısmı alüminyum plaka üzerinde yoğunlaştırıcı kısmı ise suyun geçtiği kutu içerisinde yer almaktadır.



Şekil 22. Gang vd. tarafından tasarlanan IB-PV/T güneş kolektörü [18].

Sistemde kullanılan bir kolektörün alanı  $0,967 \text{ m}^2$  PV'lerin alanı ise  $0,555 \text{ m}^2$ 'dir. Kullanılan PV modülün standart elektriksel verimi %15'dir. 23 numaralı şekilde IB-PV/T sisteminin şematik resmi görülmektedir. Sistem bir depolama tankı, gazlı ısıtıcı, sirkülasyon pompası ve IB-PV/T güneş kolektörlerinden oluşmaktadır. Kolektörler su sirkülasyon döngüsüne göre birbirlerine paralel olacak şekilde dizilmiştir.



Şekil 23. Gang vd. tarafından tasarlanan IB-PV/T sisteminin şematik resmi [18].

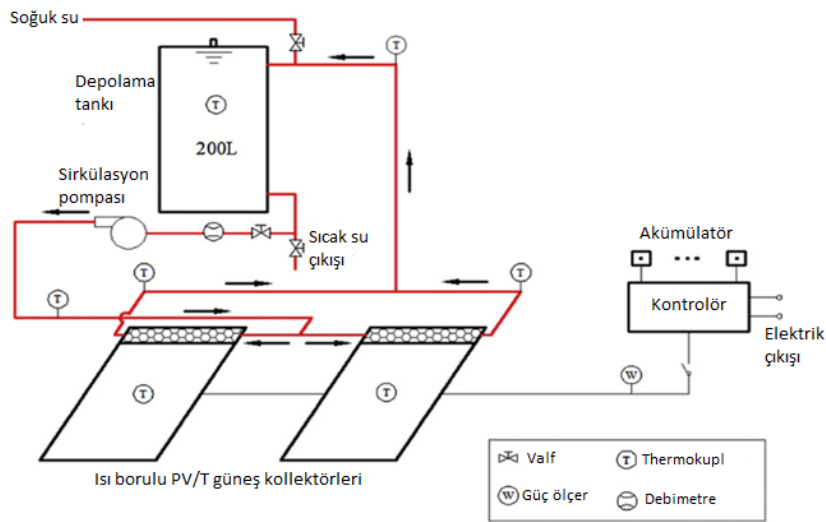
Soğuk iklime sahip bölgelerde yapılan çalışmalarda akışkanın donma riskinden dolayı amonyak-alüminyum ısı borusu kullanılmıştır. Fakat ılıman iklime sahip bölgelerde ise akışkanın donma riski olmadığı için su-bakır ısı borusu kullanılmıştır. Simülasyon çalışması saat 08:00 ila 16:30 arasında yapılmıştır. Simülasyon çalışmasında toplam kolektör alanı  $3,868 \text{ m}^2$  ve toplam PV'lerin alanı  $2,22 \text{ m}^2$  olarak alınmıştır. Depolama tankı kapasitesi de 250, 300, 350 ve 400 L olacak şekilde seçilerek simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmalarında depo içerisindeki su  $45^\circ\text{C}$  sıcaklığa ulaştıktan sonra kullanım için gönderildiği bu sıcaklığa ulaşmadığı takdirde gönderilmediği belirtilmiştir. Depo içerisindeki su gün sonunda  $45^\circ\text{C}$  sıcaklığa ulaşmazsa yardımcı ısıtıcı ekipmana sahip sistemde ısıtıcı ile su bu sıcaklığa ısıtılmaktadır. Fakat yardımcı ısıtıcı ekipmana sahip olmayan



sistemde ise depo içerisindeki su bir sonraki gün ısıtılmaya devam edilmesi için bekletilmekte ve ancak 45°C sıcaklığa ulaştıktan sonra kullanım için gönderilmektedir. Gece boyunca depodan olan ısı kayıpları bu simülasyon programında dikkate alınmaktadır. Simülasyon programı C++ dilinde yazılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda yardımcı ısıtıcı ekipmana sahip olan ve olmayan IB-PV/T sistemler için aylık ısı ve elektriksel performans değerleri belirlenmiştir. Ayrıca su depolama kapasitesine göre ısı performans değerlendirilmiş ve düşük su depolama kapasitesine sahip sistemlerin daha az ısı enerjisi elde ettiği sonucuna varılmıştır. Üretilen elektrik enerjisinin ise su depolama kapasitesinden bağımsız olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca sonuç kısmında aylara göre güneş enerjisinden yararlanma oranları ve yıllık elde edilen ısı ve elektriksel enerji miktarları belirtilmiştir.

c) Gang vd. [19] 2012 yılında yaptıkları bu çalışmalarında ısı borulu fotovoltaik/termal (IB-PV/T) sisteminin deneysel ve nümerik olarak incelemesini yapmışlardır. Bulunan deneysel sonuçlar simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçlarının doğruluğu deneysel çalışma ile kanıtlandıktan sonra, kolektördeki su debisi, kolektördeki PV pillerinin kapsam faktörü ve ısı boruları arasındaki mesafeler gibi farklı parametrik koşulların sistem performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sistemde kullanılan IB-PV/T güneş kolektörünün tabanı olarak 780x1270 mm boyutunda ve 1,16 mm kalınlığında bir parça alüminyum plaka kullanılmıştır. Kolektörde 9 adet bakır ısı borusu kullanılmış olup ısı boruları içerisindeki akışkan ise sudur. IB-PV/T güneş kolektörünün toplayıcı alanı 0,967 m<sup>2</sup> ve PV pillerin alanı ise 0,555 m<sup>2</sup>'dir. PV modül iki grup halinde konumlanmış ve 72 parçadan oluşmaktadır. PV pillerinin aynı grupta olanları birbirine seri bağlanmış fakat iki grup birbirine paralel olacak şekilde bağlanmıştır. ısı borularının buharlaştırıcı kısmı kolektör üzerinde bulunurken, yoğuşturucu kısmı ise depodan gelen suyla temas halindedir. Kolektörde cam örtüden geçen güneş ışınımının bir kısmı PV pilleri tarafından absorbe edilmekte ve elektrik enerjisine çevrilmektedir. Kalan kısmı ise ısı boruları vasıtasıyla suya iletilmekte ve ısı enerjisi olarak depolanmaktadır.

Şekil 24'de deneysel IB-PV/T sisteminin deney şeması görülmektedir. Şemadan da görüleceği üzere deney sistemi bir depolama tankı, sirkülasyon pompası, ve iki IB-PV/T güneş kolektöründen oluşmaktadır. İki kolektör birbirlerine paralel olacak şekilde su sirkülasyonu devresi ile bağlanmışlardır. Su sirkülasyonu pompası depo ile kolektörler arasında suyu sirküle ederek kolektörde toplanan ısıyı su tarafından alınmasını sağlamaktadır. Su depolama tankının kapasitesi 200 L'dir. Toplam kolektör toplayıcı alanı 1,934 m<sup>2</sup> ve toplam PV pillerin alanı 1,11 m<sup>2</sup>'dir.



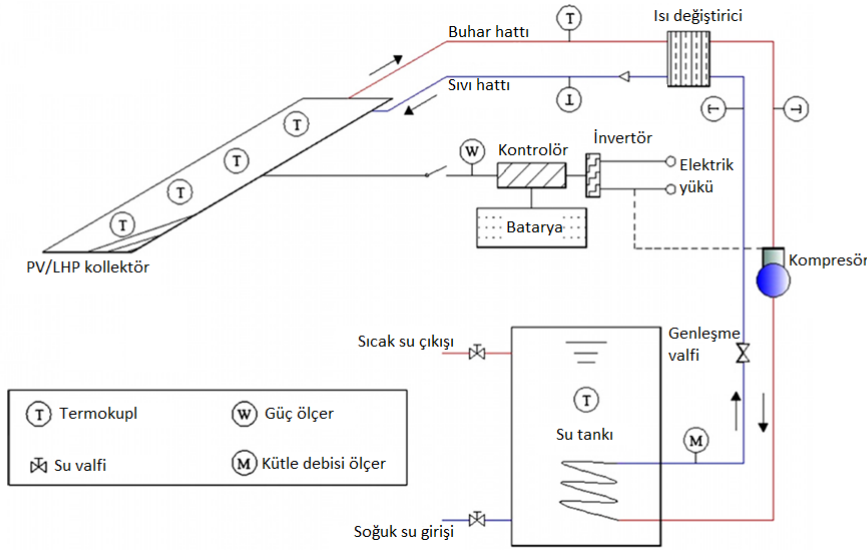
**Şekil 24.** Gang vd. tarafından tasarlanan IB-PV/T sisteminin deney şemasının resmi [19].

Yapılan bu çalışmada da PV'lerin ısı verimi 24 numaralı formül ile hesaplanmıştır. Deneyler Çin Henfei'de 7 Eylül 2010 tarihinde saat 08:00 ila 16:30 saatleri arasında gerçekleştirilmiştir. Deneyler süresince sirküle edilen suyun debisi yaklaşık olarak 9,9-10,2 L/dak debide sabit tutulmuştur. Deney

sonucunda görülmüştür ki su deposunda ki suyun sıcaklığı 28°C'den 47,1°C'ye çıkmıştır. Deneyler süresince ortalama toplam elektrik ve ısı kazancının sırasıyla 66,9 W ve 521,3 W olduğu bulunmuştur. Elektriksel ve ısı veriminin test süresince ortalama sırasıyla %10,2 ve %45,7 olduğu saptanmıştır. Bunun yanı sıra ortalama toplam enerji verimliliğinin (1. Yasa verimi) %51,5, ekserji veriminin (ikinci yasa verimi) ise %7,1 olduğu görülmüştür.

Deney sonuçları simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir. Simülasyon sonuçlarının doğruluğu deneysel sonuçlarla kanıtlandıktan sonra simülasyon programı ile yapılan çalışmalara geçilmiştir. İlk olarak depo ile kolektörler arasında sirküle edilen suyun debisinin değiştirilmesinin ısı ve elektrik kazancı üzerine etkisi gözlemlenmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki sirkülasyon suyunun debisinin artırılması elektrik, ısı kazancı ve toplam PV/T verimlerini (1. Yasa ve 2. Yasa) arttırmaktadır. Fakat suyun debisinin 0,07 kg/s'den daha fazla artırılması elektrik ve ısı kazancında çok az bir artış sağlamaktadır. Ayrıca suyun debisinin ısı kazancı üzerindeki etkisinin elektrik kazancı üzerindeki etkisinden çok daha fazla olduğu belirtilmiştir. Elektrik kazancının ve toplam PV/T verimlerinin PV pillerinin kapsam faktörünün artmasıyla beraber artış göstermiştir. Fakat sistemin ısı kazancı PV pillerinin kapsam faktörünün artmasıyla beraber düşmüştür. Isı boruları arasındaki mesafenin düşürülmesinin elektrik, ısı kazancının ve toplam PV/T verimlerini arttırmıştır. Fakat bu mesafelerin azalması kolektörde bulunan ısı borusu sayısının artması ve buna bağlı olarak kolektör maliyetlerini arttırması ile sonuç bulunmuştur.

d) Zhang vd. [20] 2013 yılında yapmış oldukları bu çalışmada sıcak su üretmek için kullanılan yeni güneş fotovoltaik/döngü-ısı borulu (PV/DIB) ısı pompası sisteminin deneysel ve teorik çalışmasını yapmışlardır. Şekil 25'de görülen bu sistem PV/DIB güneş kolektörü, bir elektrik kontrol/depolama ünitesi, buhar/sıvı taşıma hattı, düz plakalı ısı değiştirici (ısı borusu döngüsü için kondenser, ısı pompası çevrimi için evaporatördür), sıcak su tankı, kompresör, tank içerisinde spiral tip kondenser ve kısılma vanası bileşenlerinden oluşmaktadır.



**Şekil 25.** Zhang vd. tarafından tasarlanan fotovoltaik/döngü-ısı borulu (PV/DIB) ısı pompası sistemi [20].

PV/DIB ısı pompası sistemi iç ortam koşullarında Shanghai, Çin'de kurulmuştur. PV/DIB modülünün etkin absorber alanı 0,612 m<sup>2</sup>'dir. PV pilleri toplamda 36 adettir (4x9 sıralı). Isı borusu bakırdan olup, içerisindeki akışkan ise su/glikol (%95 / %5) dür. Isı pompası sistemi buharlaştırıcı ve kondenser sıcaklığı sırası ile 10°C ve 55°C'dir. Isı pompası sisteminde çalışma akışkanı olarak R134a kullanılmıştır. Çalışmanın sonuç kısmında güneş radyasyon oranına, hava sıcaklığına, rüzgar hızına, ısı pompası buharlaştırıcı sıcaklığına, cam örtü sayısına, ve ısı borusu sayısına bağlı olarak sistemin termal veriminin, elektriksel veriminin ve sistemin COP<sub>sys</sub> değerinin nasıl değiştiği hem deneysel olarak hem de simülasyon programı ile incelenmiştir. Deneysel ve simülasyon sonuçlarının ortalama %5'ten daha az bir hata ile aynı sonuçları verdiği görülmüştür. Yapılan bu çalışmada da PV/T modülünün elektriksel, termal ve sistem toplam verimliliği sırasıyla 13, 24 ve 21 numaralı formüllerden

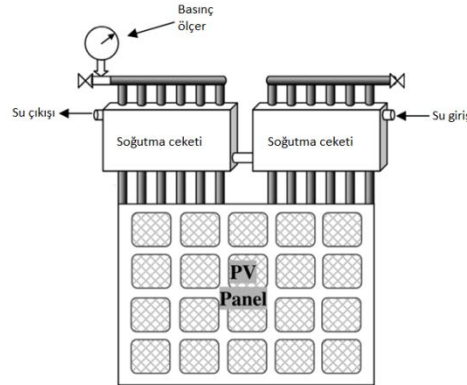


hesaplanmıştır. Sistemin  $COP_{sys}$  değeri de 27 numaralı gösterilen formülden bulunur. Bu formülde  $Q_c$  yoğuşturucuda suya verilen enerjidir.

$$COP_{sys} = \frac{Q_c + Q_s / 0,38}{N_{komp}} \quad (27)$$

Yapılan çalışma neticesinde Güneş radyasyonun, çevre hava sıcaklığının ve cam örtü sayısının artmasının termal verimin artmasına, elektriksel verimin ve sistemin  $COP_{sys}$  değerinin düşmesine yol açtığı görülmüştür. Çevre hava hızının artması ise termal verimin biraz düşmesine, elektriksel verimin ve sistemin  $COP_{sys}$  değerinin artmasına neden olduğu saptanmıştır. Isı pompası buharlaştırıcı sıcaklığının artması elektriksel ve termal verimin düşmesine fakat sistemin  $COP_{sys}$  değerinin artmasına neden olduğu görülmüştür. Isı borusu sayısının artmasının ise termal, elektriksel verimin ve sistemin  $COP_{sys}$  değerinin artmasını sağlamıştır. Son olarak laboratuvar koşullarında yapılan ölçümlerde elektriksel, termal ve toplam verimin sırasıyla %10, %40 ve %50 civarında olduğu görülmüştür. Sistem  $COP_{sys}$  değeri ise yaklaşık olarak 8,7 bulunmuştur.

e) Moradgholi vd. [21] 2014 yılında yaptıkları bu çalışmalarında ısı borulu fotovoltaik/termal (PV/T) sistemin deneysel araştırmasını yapmışlardır. İncelenen sistemde termosifon tip bir ısı borusu kullanılmıştır. Deney düzeneğinin şematik resmi şekil 26'da görülmektedir.



**Şekil 26.** Moradgholi vd. tarafından tasarlanan ısı borulu fotovoltaik/termal (PV/T) sisteminin şematik resmi [21].

Araştırılan PV/T sistemi ile ilgili deneyler ilkbahar ve yaz koşullarında olmak üzere iki ayrı mevsimde gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada termal ve elektriksel verim sırasıyla 24 ve 25 numaralı formüllerde gösterildiği şekilde hesaplanmıştır. Sistemin toplam verimliliği ise 28 numaralı formülden hesaplanmıştır.

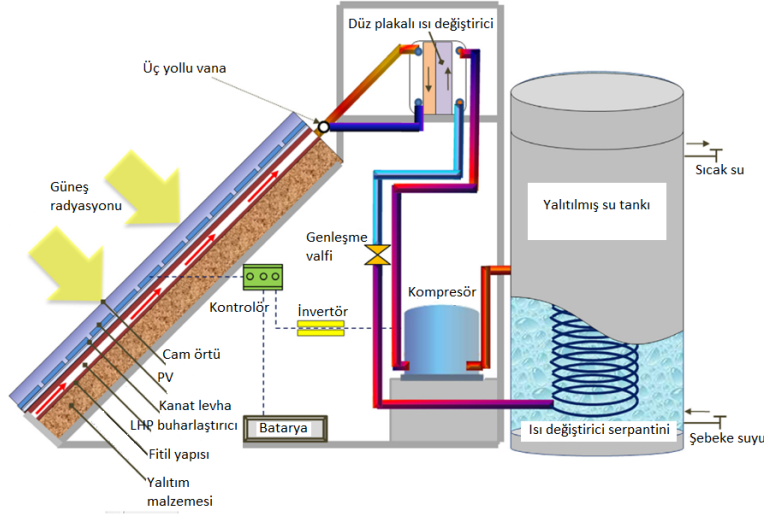
$$\eta_{PV/T} = \eta_T + K\eta_{el} \quad (28)$$

Bu formüldeki  $K$  parametresi 29 Numaralı formüldeki şekilde tanımlanmıştır.

$$K = \frac{A_{pv}}{A_{kol}} \quad (29)$$

İlkbahar koşullarında yapılan deneylerde sistem  $30^\circ$  açı ile yerleştirilmiş ve ısı boruları içerisinde de çalışma akışkanı olarak metil alkol kullanılmıştır. Deneyler süresince PV/T sistemin PV sisteme göre ortalama %0,72 daha fazla elektrik gücü ürettiği görülmüştür. Bununla birlikte PV/T sistemin termal veriminin PV sistemine göre ortalama olarak %15,3 daha fazla olduğu saptanmıştır. Yaz koşullarında yapılan deneylerde sistem  $40^\circ$  açı ile yerleştirilmiş ve ısı borularında çalışma akışkanı olarak aseton kullanılmıştır. Yapılan bu deneyler neticesinde PV/T sisteminin PV sistemine göre %0,88 daha fazla güç ürettiği belirlenmiştir. Ayrıca PV/T sistemin termal veriminin PV sistemine göre ortalama olarak %44,38 daha fazla olduğu saptanmıştır.

f) Zhang vd. [3] 2014 yılında yapmış oldukları bu çalışmalarında yeni güneş fotovoltaik/döngü-ısı borulu (PV/DIB) ısı pompası sisteminin hacim ısıtma veya sıcak su üretmesinin dinamik performansını deneysel ve teorik olarak araştırmışlardır. Şekil 27’de görülen bu sistem PV/DIB güneş kolektörü, bir elektrik kontrolü/depolama ünitesi, buhar/sıvı taşıma hattı, düz plakalı ısı değiştirici (ısı borusu döngüsü için kondenser, ısı pompası çevrimi için evaporatördür), sıcak su tankı, kompresör, tank içerisinde spiral tip kondenser ve kısılma vanası bileşenlerinden oluşmaktadır.



Şekil 27. Zhang vd. tarafından tasarlanan PV/DIB ısı pompası sisteminin şematik resmi [3].

Çalışma kapsamında dış ortam koşullarında kurulan deney düzeneği ile yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar, bilgisayar ortamında oluşturulan simülasyon programından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. PV/DIB ısı pompası sistemi dış ortam koşullarında (gerçek hava koşulu) Shanghai, Çin’de kurulmuştur. PV/DIB modülünün etkin absorber alanı  $0,612 \text{ m}^2$ ’dir ve  $30^\circ$  eğim ile kurulmuştur. PV pilleri toplamda 36 adettir (4x9 sıralı). Isı borusu bakırdan olup, içerisindeki akışkan ise 75 ml su/glikol (%95 / %5) dur. Isı pompası sistemi buharlaştırıcı ve kondenser sıcaklığı sırası ile  $10^\circ\text{C}$  ve  $55^\circ\text{C}$ ’dir. Isı pompası sisteminde çalışma akışkanı 300 g olarak R134a kullanılmıştır. Isı pompası 35 L’lik bir tankın içindeki suyu ısıtmaktadır ve tankın içerisine bakırdan spiral ısı değiştirici yerleştirilmiştir. Deneyler günlük 8 saat süreyle yapılmış ve güneşli veya bulutlu hava koşullarında 1 hafta sürede gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışma kapsamında da PV’nin elektriksel, termal ve toplam verimleri sırasıyla 13, 24 ve 21 numaralı formüller ile belirlenmiştir. Isı pompası sisteminin  $COP_{IP}$  değeri ve PV/T sisteminin toplam  $COP_{sys}$  değeri ise sırasıyla 23 ve 27 numaralı formüllerde gösterildiği şekilde hesaplanmıştır.

Sonuç kısmında analiz edilen PV/DIB sistemi geleneksel güneş paneli sistemleri ile karşılaştırılmıştır. PV/DIB sisteminin  $COP_{sys}$  değerinin geleneksel sistemlere göre 1,5-4 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Gün içerisinde PV sıcaklığı ortalama  $40^\circ\text{C}$  iken tank içerisindeki su sıcaklığının son hali ortalama  $54^\circ\text{C}$ ’leri bulmaktadır. Sistem ile ilgili sonuçlara bakıldığında ortalama elektriksel verimin %9,3 ve termal veriminin ise %39,25 olduğu saptanmıştır. Ayrıca toplam enerji ve ekserji verimliliği sırasıyla %48,37 ve %15,02 olarak bulunmuştur. Ortalama  $COP_{IP}$  ve  $COP_{sys}$  değerleri sırasıyla yaklaşık olarak 5,51 ve 8,71 olduğu belirlenmiştir.

## SONUÇ

PV/T sistemler birçok üretici tarafından ticari hale getirilmiş uygulamalardır. Bu sistemlerde farklı teknikler denenerek PV’lerin çalışma koşullarında soğutulup, ısınmalarının önüne geçilmeye çalışılmaktadır. Böylece verimlerinde oluşabilecek kayıpların önüne geçilmekte ve dahası verimlerinin artırılmaya çalışılması hedeflenmektedir. Fakat PV’lerde kullanılan soğutucu akışkanlardan

kaynaklanan farklı sorunlarla karşılaşmakta ve PV'lerden beklenen verim artışları elde edilememektedir. PV'lerin soğutulması sırasında karşılaşılan sorunların çözümü üzerine, bu araştırmada değinilen farklı teknikler denenmiştir. Bu araştırmaların birçoğunda da Tablo 1'de özetlendiği gibi verim artışları da sağlanabilmiştir.

**Tablo 1.** Literatürde yapılan çalışmaların karşılaştırılması

Referans	Yıl	Çalışmanın yapısı	PV/T'nin yapısı	PV/T'de kullanılan soğutucu akışkan	Çalışmanın amacı	PV'nin Termal verimliliği (%)	PV'nin Elektriksel verimliliği (%)	Sistem toplam verimliliği (%)
Sopian v.d. [5]	1996	Teorik	Hava ile soğutmalı PV/T	Hava	Elektrik ve sıcak hava üretimi	24-34	6-9	30-45
Solanki v.d. [6]	2009	Deneyisel	Hava ile soğutmalı PV/T	Hava	Elektrik ve sıcak hava üretimi	42	8,4	50
Kim v.d. [7]	2014	Deneyisel	Hava ile soğutmalı PV/T	Hava	Elektrik ve sıcak hava üretimi	22	15	-
Saygin v.d. [8]	2016	Deneyisel	Hava ile soğutmalı PV/T	Hava	Elektrik ve sıcak hava üretimi	48	11,5	57
Dubey ve Tiwari [9]	2008	Deneyisel ve Teorik	Su ile soğutmalı PV/T	Su	Elektrik ve sıcak su üretimi	33-64	-	-
Kabul ve Duran [10]	2014	Deneyisel	Su ile soğutmalı PV/T	Su	Elektrik ve sıcak su üretimi	-	-	-
Othman v.d. [11]	2016	Deneyisel	Su ve hava soğutmalı PV/T	Su ve hava	Elektrik, sıcak su ve hava üretimi	76	17	-
Ji v.d. [12]	2009	Deneyisel ve teorik	Isı pompalı PV/T	R22	Elektrik ve sıcak su üretimi	68,1	14,5	-
Xu v.d. [13]	2009	Teorik	Isı pompalı PV/T	R22	Elektrik ve sıcak su üretimi	-	-	-
Zhao v.d. [14]	2011	Teorik	Isı pompalı PV/T	R134a	Elektrik, sıcak su üretimi ve hacim ısıtma	55,58	19,03	70,14
Chen v.d. [15]	2011	Deneyisel	Isı pompalı PV/T	R134a	Elektrik ve sıcak su üretimi	-	-	-
Wang v.d. [16]	2015	Deneyisel	Isı pompalı PV/T	R22	Elektrik, sıcak su ve hava üretimi	36	14,5	-
Wu v.d. [17]	2011	Teorik	Isı borulu PV/T	Su	Elektrik ve sıcak su üretimi	63,65	8,45	-
Gang v.d. [18]	2012	Teorik	Isı borulu PV/T	Amonyak/Su	Elektrik ve sıcak su üretimi	-	-	-
Gang v.d. [19]	2012	Deneyisel ve Teorik	Isı borulu PV/T	Su	Elektrik ve sıcak su üretimi	45,7	10,2	51,5
Zhang v.d. [20]	2013	Deneyisel ve teorik	Isı borulu PV/T	Su-Glikol	Elektrik ve sıcak su üretimi	40	10	50
Moradgholi v.d. [21]	2014	Deneyisel	Isı borulu PV/T	Metil alkol/Aseton	Elektrik ve sıcak su üretimi	-	14	55
Zhang v.d. [3]	2014	Deneyisel ve teorik	Isı borulu PV/T	Su-Glikol	Elektrik ve sıcak su üretimi	39,25	9,3	48,37

Tablo 1'den de görüldüğü üzere PV/T'li sistemlerle ilgili yapılan çalışmalarda en düşük sistem toplam verimliliğinin %30 oranında olduğu görülmektedir. 2011 yılında Zhao vd.'nin yaptığı çalışmaya

bakıldığında ise ısı pompalı PV/T sistemi kullanılarak yapılan deneyler sonucunda bütünlük sistem toplam verimliliğinin %70 ve PV'nin elektriksel veriminin %19'lara kadar çıkarılabildiği görülmüştür. Bu konu günümüzdeki güncel araştırma konularından olup, konu üzerinde yapılan yeni araştırmalarla karşılaşılmaktadır. Ülkemizde de PV/T sistemlerin kullanım verimini arttıracak bu tip uygulamaların artırılması gereklidir. Özellikle bütünlük uygulamalarla elektrik üretimi, hacim ısıtma-soğutma, kullanım için sıcak su üretimi türü araştırma ve geliştirme çalışmalarına ağırlık verilmelidir.

## KAYNAKLAR

- [1] Enteria, N., Akbarzadeh, A., "Solar Energy Sciences and Engineering Applications", Taylor & Francis Group, 2014.
- [2] Zhang, X., Zhao, X., Smith, S., Xu, J., Yu, X., Review of R&D progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (PV/T) technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 599-617, 2012.
- [3] Zhang, X., Zhao, X., Shen, J., Xu, J. and Yu, X., Dynamic performance of a novel solar photovoltaic/loop-heat-pipe heat pump system, Applied Energy, 114, 335-352, 2014.
- [4] Chow, T.T., A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology, Applied Energy, 87, 365–379, 2010.
- [5] Sopian, K., Yigit, K. S., Liu, H. T., Kakac, S., and Veziroglu T. N., Performance Analysis of Photovoltaic Thermal Air Heaters, Energy Convers., 37, 11, 1657-1670, 1996.
- [6] Solanki, S.C., Dubey, S., Tiwari, A., Indoor simulation and testing of photovoltaic thermal (PV/T) air collectors, Applied Energy, 86, 2421–2428, 2009.
- [7] Kim, J.H., Park, S.H., Kim, J.T., Experimental performance of a photovoltaic-thermal air collector, Energy Procedia, 48, 888 – 894, 2014.
- [8] Saygin, H., Nowzari, R., Mirzaei, N., Aldabbagh, L.B.Y., Performance evaluation of a modified PV/T solar collector: A case study in design and analysis of experiment, Solar Energy 141, 210–221, 2017.
- [9] Dubey, S., and Tiwari, G.N., Thermal modeling of a combined system of photovoltaic thermal (PV/T) solar water heater, Solar Energy, 82, 602-612, 2008.
- [10] Kabul, A., Duran, F., Isparta İlinde Fotovoltaik/Termal (PV/T) Hibrit Sistemin Performans Analizi, SDU International Technologic Science, 6, 1, 31-43, 2014.
- [11] Othman, M.Y., Hamid, S.A., Tabook, M.A.S., Sopian, K., Roslan, M.H., Ibarahim, Z., Performance analysis of PV/T Combi with water and air heating system: An experimental study, Renewable Energy, 86, 716-722, 2016.
- [12] Ji, J., He, H., Chow, T., Pei, G., He, W., Liu, K., Distributed dynamic modeling and experimental study of PV evaporator in a PV/T solar-assisted heat pump, International Journal of Heat and Mass Transfer, 52, 1365–1373, 2009.
- [13] Xu, G., Deng, S., Zhang, X., Yang, L., Zhang, Y., "Simulation of a photovoltaic/thermal heat pump system having a modified collector/evaporator, Solar Energy, 83, 1967-1976, 2009.
- [14] Zhao, X., Zhang, X., Riffat, S.B., Su, Y., Theoretical study of the performance of a novel PV/e roof module for heat pump operation, Energy Conversion and Management, 52, 603–614, 2011.
- [15] Chen, H., Riffat, B.S., Fu, Y., Experimental study on a hybrid photovoltaic/heat pump system, Applied Thermal Engineering, 31, 4132-4138, 2011.
- [16] Wang, G., Quan, Z., Zhao, Y., Sun, C., Deng, Y., Tong, J., Experimental study on a novel PV/T air dual-heat-source composite heat pump hot water system, Energy and Buildings, 108, 175-184, 2015.
- [17] Wu, S.Y., Zhanga, Q.L., Xiaoa, L. and Guo, F.H., A heat pipe photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid system and its performance evaluation, Energy and Buildings, 43,3558-3567, 2011.
- [18] Gang, P., Huide, F., Jie, J., Tin-tai, C., Tao, Z., Annual analysis of heat pipe PV/T systems for domestic hot water and electricity production, Energy Conversion and Management, 56, 8-21, 2012.
- [19] Gang, P., Huide, F., Huijuan, Z., Jie, J., Performance study and parametric analysis of a novel heat pipe PV/T system, Energy, 37, 384-395, 2012.
- [20] Zhang, X., Zhao, X., Xu, J. and Yu, X., Characterization of a solar photovoltaic/loop -heat-pipe heat pump water heating system, Applied Energy, 102,1229-1245, 2013.
- [21] Moradgholi, M., Nowee, S.M., Abrishamchi, I., Application of heat pipe in an experimental investigation on a novel photovoltaic/thermal (PV/T) system, Solar Energy, 107, 82-88, 2014.



## ÖZGEÇMİŞ

### Erhan KIRTEPE

1985 yılı İzmir doğumludur. 2008 yılında Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makina Bölümünü, 2015 yılında da Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. 2014 yılında Ege Üniversitesinde yüksek lisans öğrenimini tamamlamış ve şu anda aynı üniversitede doktora öğrenimine devam etmektedir. 2010-2011 yılları arasında Şırnak Üniversitesinde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmış olup şu anda Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görevine devam etmektedir.

### Ali GÜNGÖR

1955 Elazığ doğumlu, evli ve iki kız çocuk babasıdır. Ege Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden 1977 yılında Mühendis, 1978 yılında Yüksek Mühendis ve aynı Üniversitenin Güneş Enerjisi Enstitüsü'nden 1985 yılında Doktor Mühendis derecelerini aldı. 1986 yılında Kanada'da Brace Research Institute'de altı ay araştırmalarda bulundu. 1989 yılında Isı ve Madde Transferi Bilim Dalında Doçent oldu. 1996 yılında Ege Üniversitesinde Profesör ünvanını aldı. 1997-2012 yılları arasında Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde Bölüm Başkanlığı yaptı ve halen aynı bölümde Termodinamik Ana Bilim Dalı Başkanlığını yapmaktadır.