



**Bu bir MMO  
yayıdır**

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

## **FOTOVOLTAİK TERMAL KOLLEKTÖR SİSTEMİNİN ANALİZİ**

**BERRİN KARAÇAVUŞ**  
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

**H. ÖZGÜR DOĞANAY**  
KIRKLARELİ ÇEVRE VE ŞEHİRCİLİK İL MÜDÜRLÜĞÜ

# FOTOVOLTAİK TERMAL KOLLEKTÖR SİSTEMİNİN ANALİZİ

*Analysis of Photovoltaic Thermal Collector System*

**Berrin KARAÇAVUŞ**  
**H. Özgür DOĞANAY**

## ÖZET

Fotovoltaik kolektörlerde kullanılmadan çevreye atılan atık ısı enerjinin kullanılması ve hücre sıcaklığının düşmesiyle elektrik verimliliğinin artırılması için tasarlanmış Fotovoltaik/Termal (PV/T) kolektörler üzerine yapılan çalışmalar artmıştır. Bu çalışmada, Kırklareli Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü Hizmet Binasının elektrik ihtiyacının bir sıvılı PV/T sisteminden karşılaması için tasarlanan sistemin simülasyonu üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır. PV/T sisteminde üretilen termal enerji bir ısı değiştiricisi aracılığı ile su ısıtılmasında değerlendirilmiştir. Sistem tasarımı, Kırklareli 2012 hava verileri ve Kırklareli Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü Hizmet Binasının 2012 yılı elektrik tüketim miktarı baz alınarak, TRNSYS; “Transient System Simulation” programında yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** PV/T kolektör, TRNSYS, Termal ve elektrik verimi.

## ABSTRACT

Studies on Photovoltaic / Thermal (PV/T) collectors which are designed for waste heat energy usage to environment without being used on photovoltaic collectors and electrical efficiency by decreasing cell temperature have been increased. In this study, conclusions and inferences are drawn from the simulation of a liquid PV/T system, designed to meet the electrical needs of Kırklareli Provincial Directorate of Environment and Urbanisation service building. Thermal energy produced in the PV/T system is used to heat water through a heat exchanger. System design has been realized by TRNSYS (Transient System Simulation) Programme based upon Kırklareli / TURKEY 2012 weather datum and Kırklareli Environmental and City Planning Department Service Building's electrical consumption amount for 2012.

**Key Words:** PV / T collector, TRNSYS, Thermal and electrical efficiency.

## 1. GİRİŞ

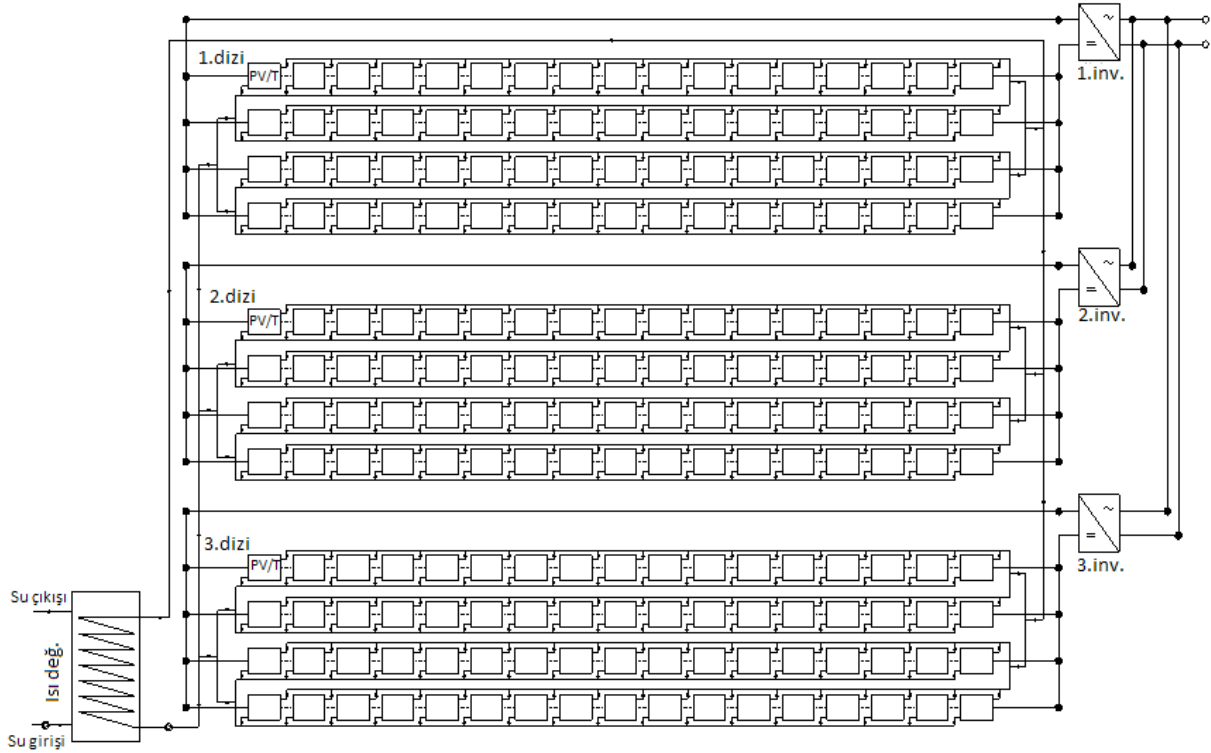
Günümüzde, güneş enerjisini kullanan sistemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Güneş enerjisinden fotovoltaik dönüşüm ilkesinden yararlanarak güneş pilleri vasıtasıyla elektrik enerjisi elde edilmektedir. Güneş pilleri tarafından soğurulan güneş ışınımının çoğu elektrik enerjine dönüştürülemez ve hücre sıcaklığını artırarak elektriksel verimi düşürür. Dolayısıyla, fotovoltaik modüllerin (PV) sıcaklığı doğal ya da zorlanmış akışkan dolaşımı ile soğutma yapılarak düşürülebilir. Bu amaçla son yıllarda PV modüllerinin tek başına kullanılmasına bir seçenek olarak aynı anda elektrik ve ısı enerjisi üretebilen bir PV modülün soğutma donanımı ile birlikte kullanıldığı hibrit fotovoltaik / termal toplayıcı (PV/T) sistemleri üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır [1].

Günümüzde üretilen ticari güneş pilleri güneş enerjisini %20'den daha düşük bir verimle elektrik enerjine dönüştürmektedir. Elektrik enerjisine dönüştükten sonra gelen güneş enerjisini %80'inden

fazlası çevreye atılır [2]. Elektrik verimini artırmak için termal toplayıcılar fotovoltaik hücrelerle birleştirilerek düşük sıcaklıkta ısı ve elektrik enerjisi elde etmek üzere hibrit enerji üreteçleri olarak kullanılmaktadır.

## 2. SİSTEM TASARIMI

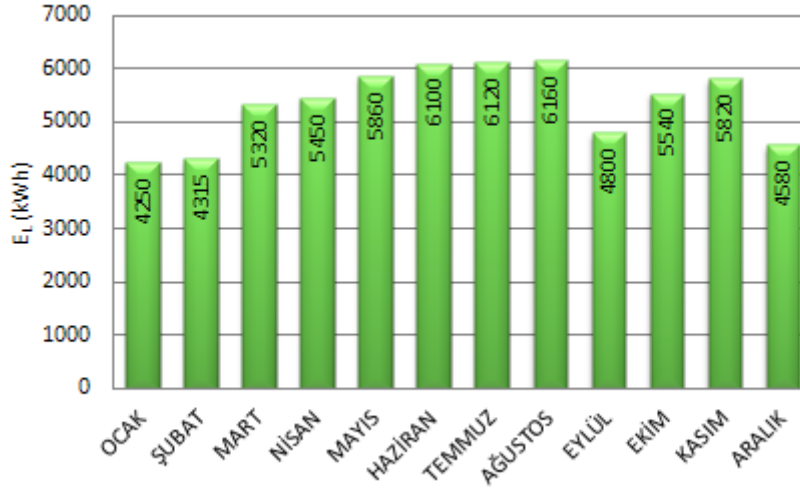
Kırklareli iklim şartlarında, güneş enerjisinden elektrik üreten bir sıvılı PV/T sistemi tasarlanmıştır. PV/T sisteminde üretilen termal enerji bir ısı değiştiricisi aracılığı ile su ısıtılmasında değerlendirilmiştir. Sistemin analizi, TRNSYS; “Transient System Simulation” programında yapılmıştır [3]. Sistem tasarımında, Kırklareli Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü Hizmet Binası elektrik yükü baz alınmıştır. Sistem elektrik şebekesine bağlı olacak şekilde tasarlanmıştır. Kırklareli Meteoroloji İl Müdürlüğünden Kırklareli hava verileri alınarak, Devcpp programında saatlik olarak kullanıcı formatında hazırlanmıştır. Sistem; PV/T modüllerden oluşmuş diziler, inverterler, ısı değiştiricileri, pompalar, şebeke suyu çizelgesi, Kırklareli iline ait hava veri okuyucusu, gerekli eşitlikler, online-plotter, yazıcılar ve akış bölücüler gibi TRNSYS bileşenlerinden oluşmaktadır. PV/T modüller, verilen radyasyon şartlarında maksimum güç noktasında (MPP) çalışmaktadır. Şekil 1.'de sisteme ait akış şeması verilmektedir [1].



Şekil 1. Sisteme ait akış şeması [1].

### 2.1. Sistem Yüğü

Sistem tasarımı Kırklareli Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü Hizmet Binasının 2012 yılı aylık elektrik tüketimi esas alınarak yapılmıştır. Şekil 2.'de aylık tüketimler verilmiştir [4].



**Şekil 2.** Kırklareli Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü Hizmet Binasının 2012 yılı elektrik tüketimin aylara göre değişimi.

## 2.2. PV/T Kolektörleri Üzerine Gelen Işınım Hesabı

Eğimli yüzeye gelen ışınım hesabında, Perez vd. tarafından geliştirilmiş eğimli yüzey ışınım modeli kullanılmıştır [5]. Eğimli yüzeye gelen toplam ışınım, eğimli yüzeye gelen direkt, difüz ve yansıyan ışınımın toplamı olmak üzere aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$$I_T = I_{bT} + I_{dT} + I_{gT} \quad (W/m^2) \quad (1)$$

## 2.3. PV/T Kolektörler

Sistemde kullanılan PV/T kolektörlerde birim kolektör alanı başına genel ısı kayıp katsayısı  $U_L$ , çalışma sıcaklığı, rüzgâr hızı ve kolektör konstrüksiyonuna bağlı parametrelerin fonksiyonu olarak alınmıştır. PV/T dizisi, seri ve paralel bağlı modüllerden oluşmuştur ve PV/T dizisinin toplam termal performansı, seri bağlı modüllerin sayısına ve her modülün özelliğine göre değişir [3].

İşletme sıcaklığında bir PV/T modülünde, absorbe edilen radyasyonun bir kısmı elektrik enerjisine, geri kalan kısmı ise termal enerjiye dönüştürülür. Birim alana sahip PV/T modülü için enerji denklemi aşağıdaki şekilde verilebilir.

$$C_t \frac{dT}{dt} = \dot{E}_{rad} - \dot{E}_{el,DC} - \dot{E}_{loss} \quad (W/m^2) \quad (2)$$

Eşitlikte; soldaki terim PV/T modülünde depolanan termal enerji ve  $C_t$  ((J/m<sup>2</sup>K), sağdaki terimler sırası ile  $\dot{E}_{rad}$  (W/m<sup>2</sup>) PV/T modülünde güneş radyasyonunun absorbe edilmesi ile oluşan enerji kazancı,  $\dot{E}_{el,DC}$  (W/m<sup>2</sup>) PV/T modülünde üretilen elektrik enerjisi,  $\dot{E}_{loss}$  (W/m<sup>2</sup>) ise PV/T modülünden çevresine olan enerji kaybıdır.

$$\dot{E}_{rad} = (\tau\alpha)I_T \quad (W/m^2) \quad (3)$$

$$\dot{E}_{el,DC} = \eta_c I_T \quad (W/m^2) \quad (4)$$

$$\dot{E}_{loss} = U_L (T_c - T_a) \quad (W/m^2) \quad (5)$$

Eşitliklerde;  $\tau\alpha$  modülün genel güneş ışınımını yutma-geçirme çarpımını,  $\eta_c$  işletme şartlarında modülün elektrik verimini,  $I_T$  ( $W/m^2$ ) ise PV modülüne gelen toplam güneş ışınımını,  $U_L$  ( $W/m^2 K$ ) kolektör alt ve kenarları için ısı kayıp katsayısını,  $T_c$  (K) işletme şartlarındaki ortalama modül sıcaklığını,  $T_a$  (K) hava sıcaklığını ifade etmektedir.

Anlık PV/T modül elektrik dönüşüm verimliliği Eşitlik (6)'da verilmiştir [2].

$$\eta_{el} = \left( \frac{\dot{E}_{DC} A_m}{I_T A_m} \right) = \eta_{c,ref} [1 - C(T_c - T_{c,ref})] \quad (6)$$

Burada;  $\dot{E}_{DC}$  ( $W/m^2$ ) PV/T modülü DC güç çıktısı,  $I_T$  ( $W/m^2$ ) modül üzerine gelen toplam ışınım,  $A_m$  ( $m^2$ ) modül alanı,  $\eta_{c,ref}$  standart referans şartlarında modül elektrik verimi,  $C$  (1/K) PV hücresi veriminin sıcaklık katsayısı,  $T_c$  ve  $T_{c,ref}$  (K) ise sırası ile işletme şartlarındaki modül sıcaklığı, referans şartlardaki modül sıcaklığı (298.15 K) anlamındadır [3].

Aylık PV/T dizisi DC elektrik verimi ise

$$\eta_{el,m} = \left( \frac{\bar{E}_{DC,d}}{\bar{I}_T A_{arr}} \right) \quad (7)$$

şeklinde tarif edilebilir. Eşitlikte;  $\bar{E}_{DC,d}$  (kWh/gün) aylık ortalama günlük DC çıktısı,  $\bar{I}_T$  (kWh/m<sup>2</sup>gün) aylık ortalama günlük güneş ışınımı,  $A_{arr}$  ( $m^2$ ) PV/T dizi alanıdır.

Aylık AC elektrik verimi Eşitlik (8)'de verilmiştir.

$$\eta_{el,AC,m} = \left( \frac{\bar{E}_{AC,d}}{\bar{I}_T A_{arr}} \right) \quad (8)$$

Eşitlikte;  $\bar{E}_{AC,d}$  (kWh/gün) aylık ortalama günlük AC çıktısı,  $\bar{I}_T$  (kWh/m<sup>2</sup>gün) aylık ortalama günlük güneş ışınımı,  $A_{arr}$  ( $m^2$ ) PV/T dizi alanıdır.

PV/T dizisi içindeki modüllerde depolanan termal enerjinin tümünü çalışma sıvısına aktarmak mümkün değildir. Dizi içindeki modüllerin her birinin toplamış oldukları faydalı enerji kazancı  $\dot{E}_u$  Hottel-Whillier eşitliği ile aşağıda verilmiştir [3].

$$\dot{E}_u = AF_R [I_T (\tau\alpha) - U_L (T_i - T_a)] = \dot{m} C_{p,c} (T_o - T_i) \quad (W) \quad (9)$$

Burada;  $A$  ( $m^2$ ) toplam kolektör açıklık veya brüt alanı,  $F_R$  kolektör genel ısı kazanç faktörü,  $(\tau\alpha)$  kolektör genel yutma-geçirme çarpımı,  $U_L$  ( $W/m^2K$ ) birim alan başına kolektör genel ısı kayıp katsayısı,  $T_i$  (K) çalışma sıvısının kolektöre giriş sıcaklığı,  $T_a$  (K) hava sıcaklığı,  $T_o$  (K) çalışma sıvısının kolektörden çıkış sıcaklığı,  $\dot{m}$  (kg/s) çalışma sıvısının debisi,  $C_{p,c}$  ( $J/kgK$ ) çalışma sıvısının özgül ısısını ifade eder.  $F_R$  kolektör genel ısı kazanç faktörü aşağıdaki gibi verilir [3].

$$F_R = \frac{\dot{m} C_{p,c}}{U_L A} \left( 1 - \exp \left( - \frac{F' U_L A}{\dot{m} C_{p,c}} \right) \right) \quad (10)$$

Burada;  $F'$  kolektör verim faktörü olup aşağıdaki gibi verilir [4].

$$F' = \left( \frac{1}{U_L} \right) / \left( W \left( \left( \frac{1}{U_L (D + (W - D)F)} \right) + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D h_f} \right) \right) \quad (11)$$

Eşitlikte;  $W$  (m) ısı taşıyıcı akışkanın geçtiği boruların arasındaki boşluk,  $D$  (m) borunun iç çapı,  $F$  standart kanat verimi  $C_b$  (W/mK) sınır iletkenliği,  $h_f$  (W/m<sup>2</sup>K) boruların içindeki ısı transfer katsayısını göstermektedir [6].

Modülün genel yutma-geçirme çarpımı Eşitlik (12)'de verilmiştir [3].

$$(\tau\alpha) = \frac{I_{bt} (\tau\alpha)_b + I_d ((1 + \cos) / 2) (\tau\alpha)_s + \rho_1 ((1 - \cos\beta) / 2) (\tau\alpha)_g}{I_T} \quad (12)$$

Eşitlikte;  $I_{bt}$  (W/m<sup>2</sup>) kolektöre gelen ışınım oranı,  $(\tau\alpha)_b$  insidans açısına bağlı güneş ışınımı için kolektör genel yutma-geçirme çarpımı,  $I_d$  (W/m<sup>2</sup>) kolektöre gelen yatay diffüz ışınımı,  $(\tau\alpha)_g$  gökyüzü diffüz ışınım için kolektör genel yutma-geçirme çarpımı  $(\tau\alpha)_g$  zeminden yansıtılan ışınım için kolektör genel yutma-geçirme çarpımı,  $I_T$  (W/m<sup>2</sup>) modül üzerine gelen toplam güneş ışınımını,  $\rho_1$  zemin yansıtma katsayısını göstermektedir.

Bir modülden sıvı çıkışı  $T_o$  (K) sıcaklığı Eşitlik (13) ile verilmiştir [3].

$$T_o = \frac{AF_R [I_T (\tau\alpha) - U_L (T_i - T_a)]}{m_c \dot{C}_{p,c}} + T_i \quad (^\circ\text{C}) \quad (13)$$

Kolektörde akış olmadığı durumda ise durgunluk sıcaklığı  $T_p$  (K) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [3].

$$T_p = I_T (\tau\alpha) / U_L + T_a \quad (^\circ\text{C}) \quad (14)$$

PV/T modülünün anlık termal verimi Eşitlik (15)'de verilmiştir.

$$\eta_{ter} = \left( \frac{\dot{E}_u}{A_m I_T} \right) \quad (15)$$

PV dizisinin aylık termal verimi ise aşağıdaki gibi tarif edilebilir [3].

$$\eta_{ter,m} = \left( \frac{\bar{E}_{u,d}}{\bar{I}_T A_{arr}} \right) \quad (16)$$

Eşitlikte;  $\bar{E}_{u,d}$  (kWh/gün) PV/T modülün aylık ortalama günlük termal çıktısı,  $\bar{I}_T$  (kWh/ m<sup>2</sup>gün) aylık ortalama günlük güneş ışınımıdır.

Aylık inverter verimi ise,  $\bar{E}_{AC,d}$  (kWh/gün) inverter aylık ortalama günlük toplam AC çıktısı,  $\bar{E}_{DC,d}$  (kWh/gün) inverter aylık ortalama günlük toplam DC çıktısı olmak üzere aşağıdaki gibi tarif edilebilir.

$$\eta_{i,m} = \left( \frac{\bar{E}_{AC,d}}{\bar{E}_{DC,d}} \right) \quad (17)$$

PV/T modüllerinde hidrolik bağlantı (su sirkülasyonu) için TRNSYS’de iki çeşit ön çalışma yapılmıştır. Seri bağlantı yapılan simülasyonda, sırası ile PV/T modüllerde elektrik çıktısı düşmekte buna karşın PV sıcaklığı, dolayısı termal çıktısı artmaktadır. Paralel bağlantı yapılan simülasyonda ise tüm PV/T modüllerde aynı elektrik çıktısı, aynı PV sıcaklığı ve modül sıvı çıkış-giriş sıcaklık farkı daha düşük tespit edildi. Çalışmada esas amaç elektrik üretmek olduğundan, sistem tasarımında PV/T modüllerinde paralel hidrolik bağlantı seçilmiştir.

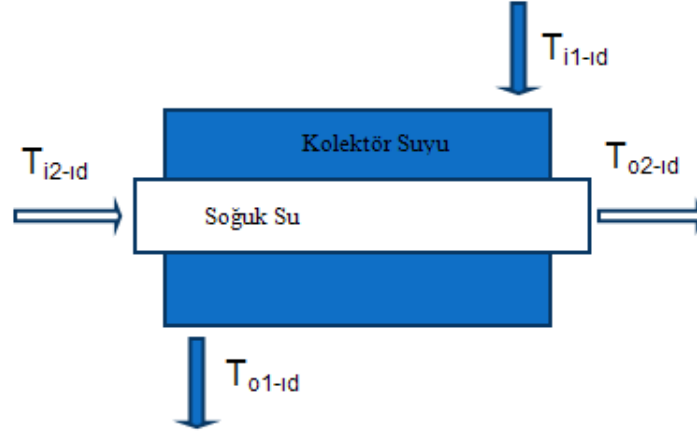
Sistemde kullanılan PV/T modül ve invertere ait özellikler Tablo1.’de verilmiştir.

**Tablo 1.** PV/T modül ve inverter özellikleri [1]

Absorber yüzeyi	Mono Kristal	
	Gösterim	Değer
Tanımlama		
Brüt kolektör alanı	$A(m^2)$	1.7
Kolektör açıklık alanı	$A_a(m^2)$	1.36
Kolektör absorber alanı	$A_{ab}(m^2)$	1.3
Hücre sayısı		72
Referans şartlarda modül gücü	$P_{MPP}(W_p)$	200
Referans şartlarda mak. güç noktasında modül akımı	$I_{MPP}(A)$	5,43
Referans şartlarda mak. güç noktasında modül gerilimi	$V_{MPP}(V)$	36.8
Referans şartlarda modül kısa devre akımı	$I_{sc}(A)$	5.67
Referans şartlarda modül açık devre gerilimi	$V_{oc}(V)$	46.43
Isı değiştiricisi ve iç borular		bakır
Kolektör verimlilik faktörü	$F'$	0.96
Kolektör akışkanın özgül ısı	$C_{pf}(kJ/kg K)$	4.19
Cam kapak sayısı	Camsız	0
Kolektör alt ve kenarları için ısı kayıp katsayısı	$U_L(kJ/h m^2 K)$	1.1
Yutma-geçirme çarpımı	$\tau\alpha$	0.9
PV hücre verimliliğinin sıcaklık katsayısı	$C$	0.0032
PV hücre verimliliği için referans sıcaklık	$T_{c,ref}(^{\circ}C)$	25
Referans şartlarda gelen toplam ışınım	$G_{T,ref}(W/ m^2)$	1000
Dizi içindeki paralel modül sayısı	$N_p$	4
Dizi içindeki seri modül sayısı	$N_s$	16
Dizi sayısı	$N$	3
Bir invertere bağlanacak dizi sayısı		1
İnverter aktif gücü	$P_i(kW)$	15
İnverter maksimum giriş akımı	$I_{i,g}(A)$	25
İnverter maksimum DC gerilimi	$V_{max,DC}(V_{dc})$	900
İnvertermaksium güç noktasında gerilim aralığı	$V_{MPP}(V_{dc})$	620-850
İnverterAC gerilimi	$V_{AC}(V_{ac})$	380±20%
Maksimum çıkış akımı	$I_{i,\zeta}(A)$	22.8

## 2.4. Sistemde Kullanılan Isı Değiştiricisi

Sistemde PV/T kolektörlerden gelen sıcak suyun değerlendirilmesi için sudan suya ters akışlı ısı değiştiricileri kullanılmıştır. Isı değiştiricisinin şematik gösterimi Şekil 3.'deki gibidir. Burada  $T_{i1-id}$  kolektörlerden gelen su sıcaklığı,  $T_{o1-id}$  ısı değiştiriciden çıkan ve kolektörlere giden su sıcaklığı,  $T_{i2-id}$  şebekeden gelen su sıcaklığı,  $T_{o2-id}$  ısı değiştiriciden çıkan ve su sıcaklığı yeterli ise kullanıma yeterli değilse ek ısıtıcıya giden su sıcaklığıdır.



Şekil 3. Isı değiştiricisinin şematik gösterimi [4].

## 2.5. Güneş enerjisinden Faydalanma Oranı

PV/T sisteminden gerekli elektrik yükünü aylık karşılama oranı (sistemden aylık faydalanma oranı), aylık toplam elektrik yükü  $E_{l,m}$  (kWh/ay) ve sistemden sağlanan aylık toplam AC elektrik enerjisi  $E_{AC,m}$  (kWh/ay) fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi tarif edilebilir [3].

$$f_m = \frac{E_{AC,m}}{E_{L,m}} \quad (18)$$

Sistemde PV/T kolektörlerden gelen sıcak suyun değerlendirilmesi için sudan suya ters akışlı ısı değiştiricileri kullanılmıştır.

## 3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

TRNSYS programında tasarlanan sistemde, PV/T modül eğim açısı  $\beta$ , aşağıda sıralanan durumlar için hesaplanmış ve bu açılarda sistemin analizi yapılmıştır.

Yıllık optimum verim için, modülün optimum eğim açısı enlem açısı  $E$  ( $^\circ$ )'nin fonksiyonu olarak Eşitlik (19)'da verilmiştir [7].

$$\beta = E \cdot 0.9 = 41.0,9 \cong 37^\circ \quad (^\circ) \quad (19)$$

En soğuk üç ay için ve en sıcak üç ay için optimum açılar sırası ile Eşitlik (20) ve (21) ile aşağıda verilmiştir [5].

$$\beta = E + 25^\circ = 41 + 25 = 66^\circ \quad (^\circ) \quad (20)$$

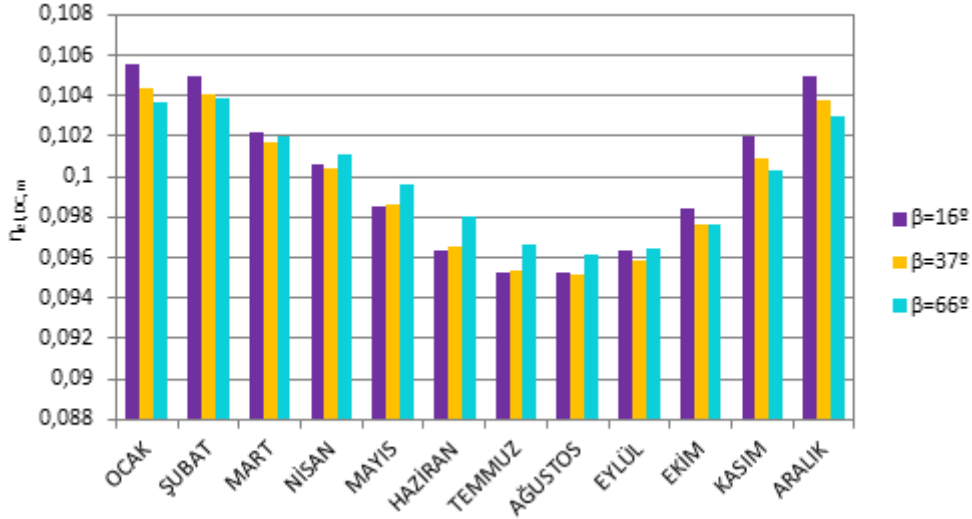
$$\beta = E - 25^\circ = 41 - 25 = 16^\circ \quad (^\circ) \quad (21)$$



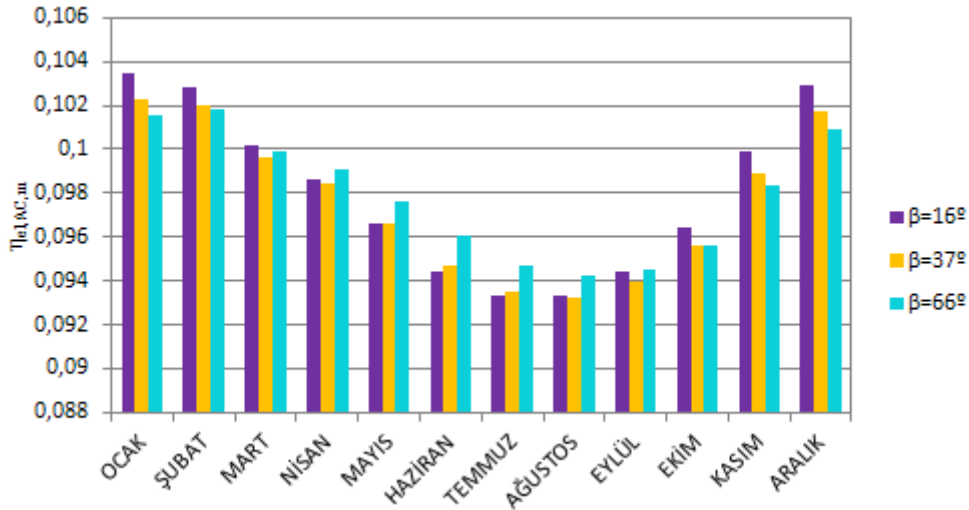
Optimum eğim açısı için  $37^\circ$ , en soğuk üç ay için optimum eğim açısı  $66^\circ$  ve en sıcak üç ay için optimum eğim açısı  $16^\circ$  olarak hesaplanmıştır. Yapılan tasarımda Kırklareli İli için ayrı hesaplama yapılarak değerlendirme yapılmıştır.

TRNSYS programında tasarlanan sistemde veriler ve simülasyon çıktıları, bir integratör aracılığı ile saatlik, günlük ve aylık zaman dilimlerinde integre edilmiştir.

PV/T dizisinin aylık ortalama DC elektrik verimi ve PV/T dizisinin aylık ortalama AC elektrik verimi sırası ile Şekil 4. ve Şekil 5.'de verilmiştir.



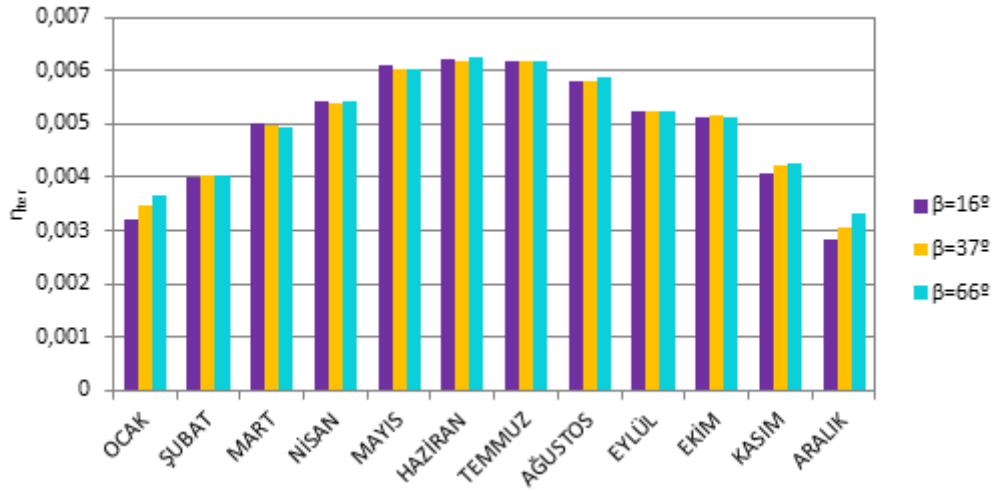
Şekil 4. PV/T dizisinin aylık ortalama DC elektrik verimi.



Şekil 5. PV/T dizisinin aylık ortalama AC elektrik verimi [1].

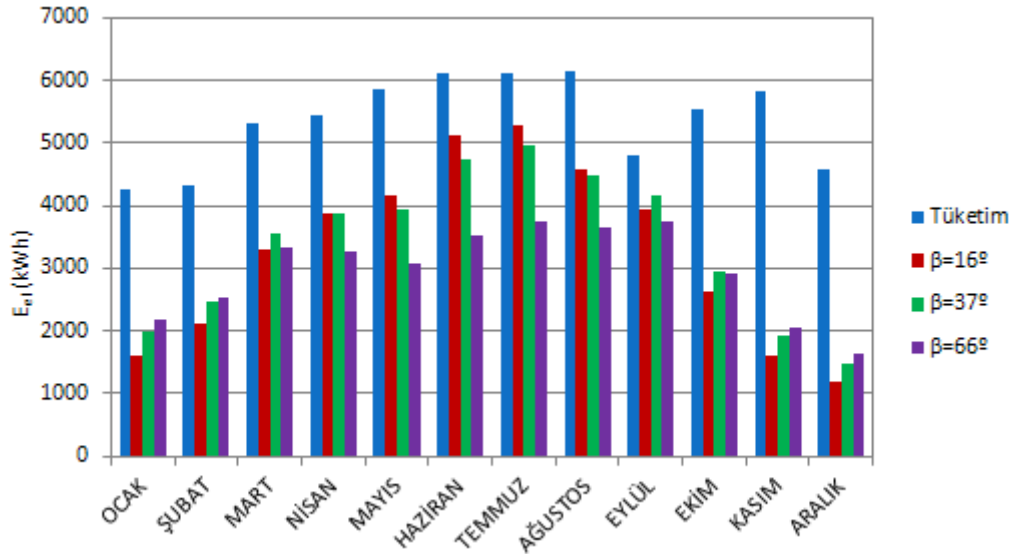
Şekil 4. ve Şekil 5.'de, sistemin kış aylarında  $16^\circ$  eğim açısı için maksimum derecede elektrik üretim verimine sahip olduğu görülmektedir. Kış aylarında  $16^\circ$  eğim açısı sistemin elektrik üretim veriminin,  $66^\circ$  eğim açılı sistemin elektrik üretim veriminden fazla olmasının nedeni hücre sıcaklığının daha düşük olmasıdır. Aynı nedenle yaz aylarında hücrelerin ortalama sıcaklıklarının artması ile elektrik üretim verimlerinin düştüğü görülmektedir.

Şekil 6.'da görüldüğü üzere ortam sıcaklığının artması nedeni ile termal verimin arttığı görülmektedir.



Şekil 6. PV/T dizisinin aylık ortalama termal verimi [1].

Şekil 7.'de Kırklareli Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü Hizmet Binasının 2012 yılı elektrik tüketim miktarları ile oluşturulan sistemde üretilen elektrik enerjisi miktarlarının aylara göre değişimi gösterilmektedir [1].

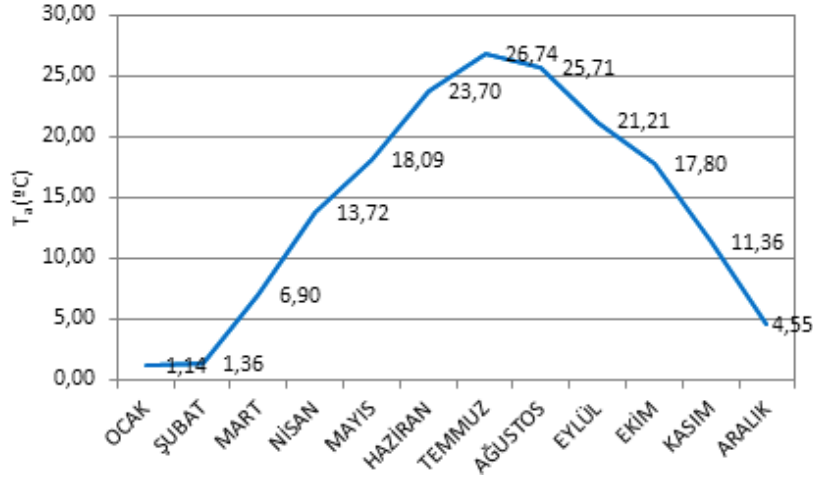


Şekil 7. Tüketilen elektrik enerjisi ile tasarlanan sistemde farklı eğim açılarındaki üretilen elektrik enerjisi aylara göre değişimi.

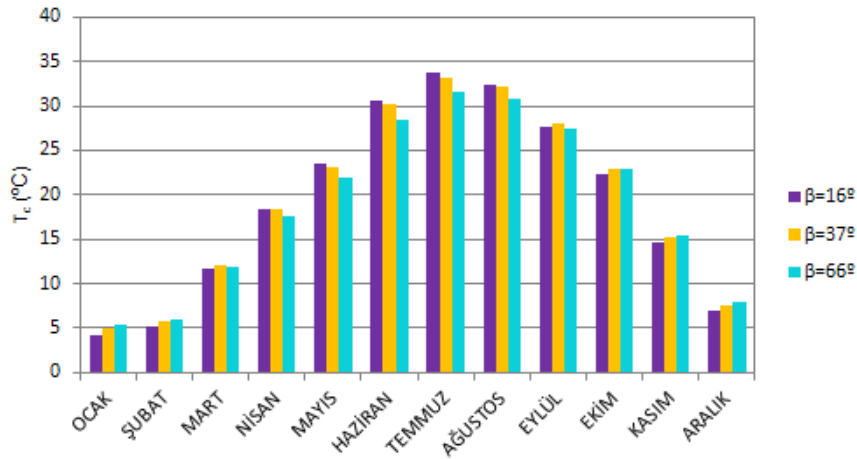
Şekil 7.'de görüldüğü gibi yaz aylarında klimaların kullanılmasıyla enerji tüketiminin artmasına rağmen, üretilen enerji miktarı tüketim miktarına yaklaşmaktadır. 16° kolektör eğim açılı sistem Haziran ayında, 37° kolektör eğim açılı sisteme göre % 8.24 oranında, 66° kolektör eğim açılı sisteme göre % 45.04 daha fazla enerji üretmektedir. 66° kolektör eğim açılı sistem ise kış aylarında, 37° kolektör eğim açılı sisteme göre % 10.87 oranında, 66° kolektör eğim açılı sisteme göre % 39.16 daha fazla enerji üretmektedir. Yaz ve kış ayları için optimum kolektör eğim açılarının sağlanmasıyla % 45 değerine kadar, daha fazla enerji elde edileceği görülmektedir.

Aylık ortalama PV modül sıcaklığı Şekil 8.'de, aylık ortalama dış hava sıcaklığı Şekil 9.'da verilmiştir. Yaz aylarında 16° kolektör eğim açılı hücrenin, kış aylarında 66° kolektör eğim açılı hücrenin sıcaklığı daha yüksektir. Bunun nedeni kolektörde toplanan ışıınım miktarıdır. Ayrıca Şekil 8.'de görüldüğü gibi

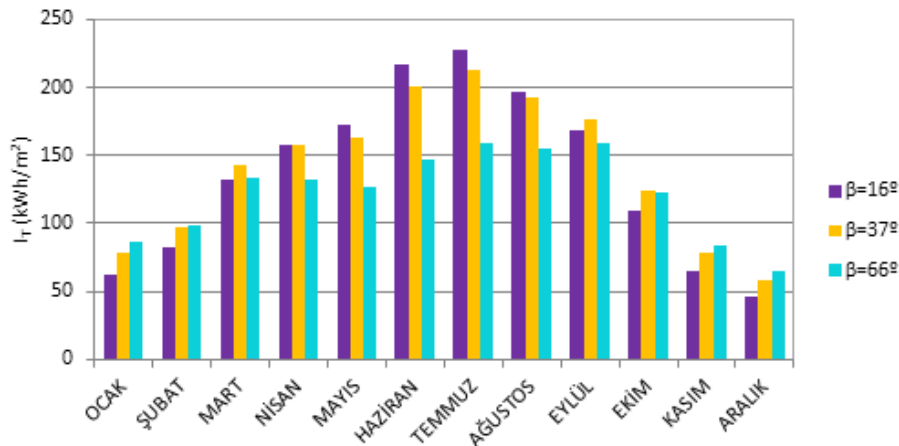
modül sıcaklığı, ortam sıcaklığına paralel olarak artmaktadır. PV/T sistemine gelen toplam ışınım miktarının aylara göre değişimi Şekil 10.'da verilmiştir.



Şekil 8. Aylık ortalama dış hava sıcaklığı.

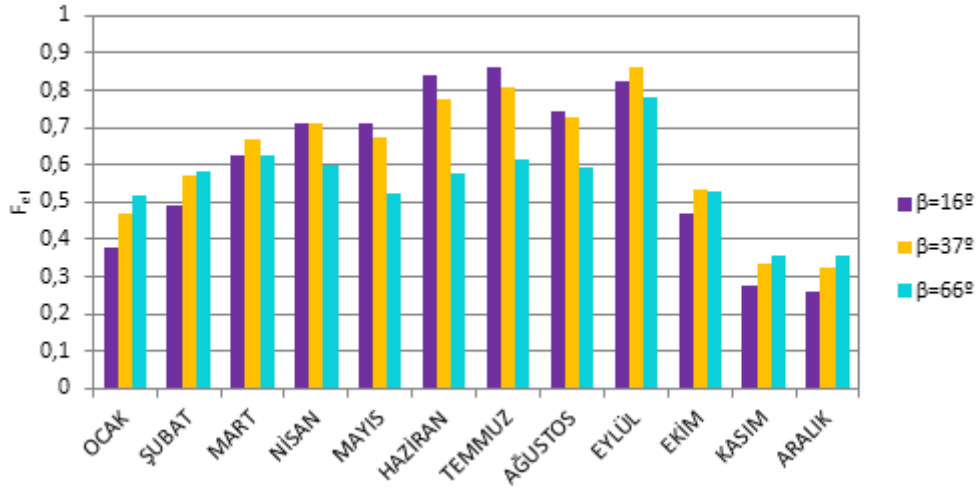


Şekil 9. Aylık ortalama PV modül sıcaklığı



Şekil 10. PV/T sistemine gelen toplam ışınım miktarının aylara göre değişimi.

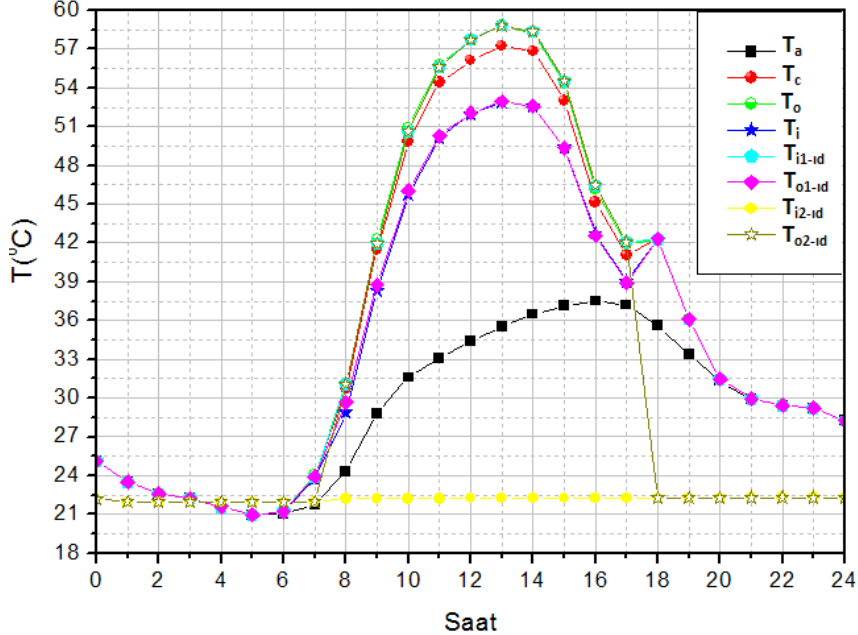
Sistemden faydalanma oranının aylara göre değişimi Şekil 11.'de verilmiştir.



Şekil 11. Sistemden faydalanma oranının aylara göre değişimi.

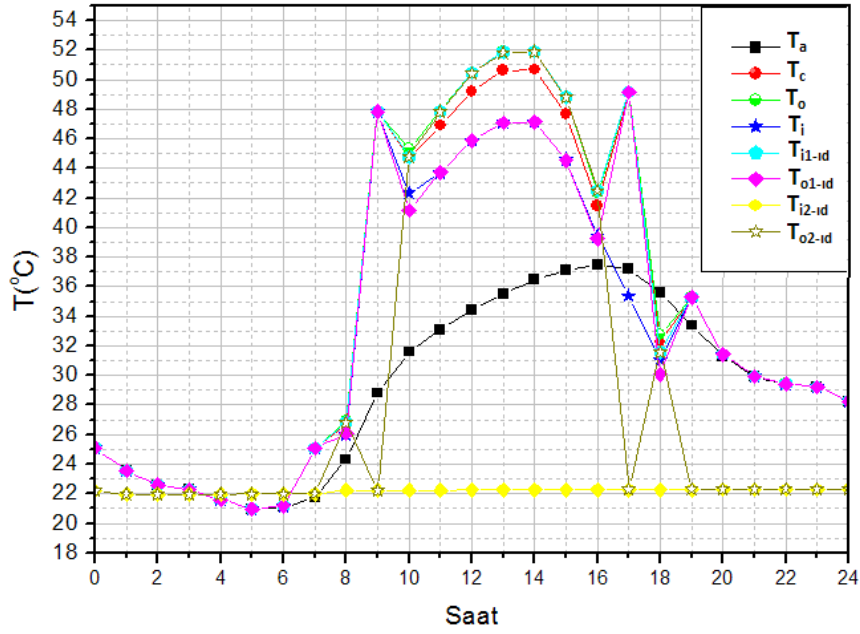
Şekil 11.'de görüldüğü üzere sistem faydalanma oranının,  $16^\circ$  kolektör eğim açısı için temmuz ayında maksimum noktaya ulaştığı görülmektedir. Bunun nedeni yaz aylarında ışınım miktarının yüksek olması ve güneş ışınlarının dünyaya daha dik gelmesi sonucu  $16^\circ$  kolektör eğim açılı sistemin daha fazla enerji üretmesidir. Sistem faydalanma oranı,  $16^\circ$  kolektör eğim açılı sistemde yaz aylarında % 86'ya,  $66^\circ$  kolektör eğim açılı sistem kış aylarında % 35'e kadar çıkmaktadır.

Temmuz ayında  $16^\circ$  kolektör eğim açısı için maksimum noktaya ulaştığından, Temmuz ayı için ortalama değeri temsil eden 17. Günü için sistemdeki sıcaklıkların değişimi Şekil 12.'de verilmiştir.



Şekil 12. 17 Temmuz için  $16^\circ$  eğim açısında PV/T sistemindeki sıcaklık dağılımları.

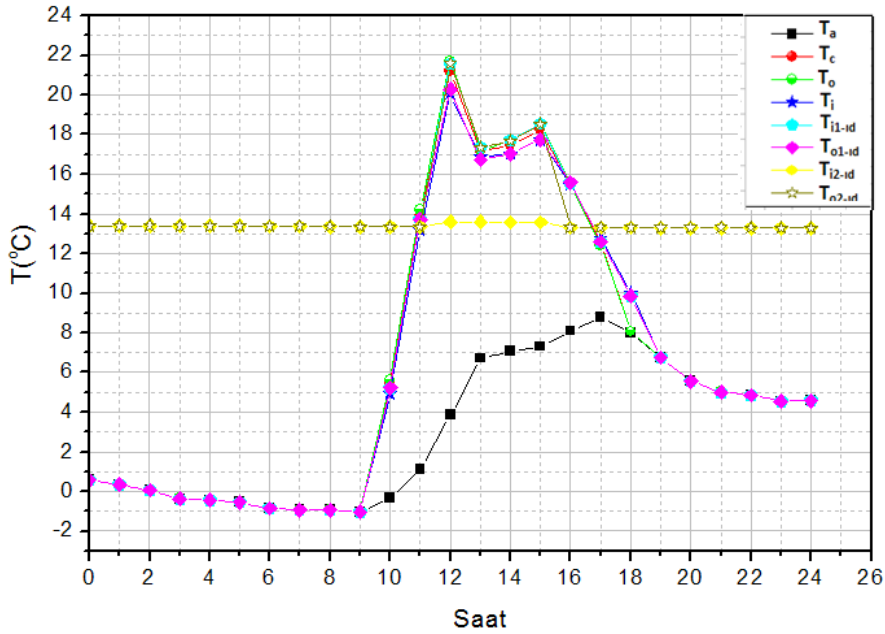
Şekil 12.'de görüldüğü üzere gün içindeki dağılımlarda; maksimum sıcaklıklar PV/T hücre ortalama sıcaklığı  $57.24^\circ\text{C}$ , şebeke suyunun ısı değiştiricisine giriş sıcaklığı  $22.25^\circ\text{C}$  ve ısı değiştiricisinden çıkış sıcaklığı  $58.80^\circ\text{C}$  saat 13:00'de olduğu görülmüştür. Temmuz ayı için ortalama değeri temsil eden 17. Günü için  $66^\circ$  eğim açılı sistemdeki sıcaklıkların değişimi Şekil 13.'de verilmiştir.



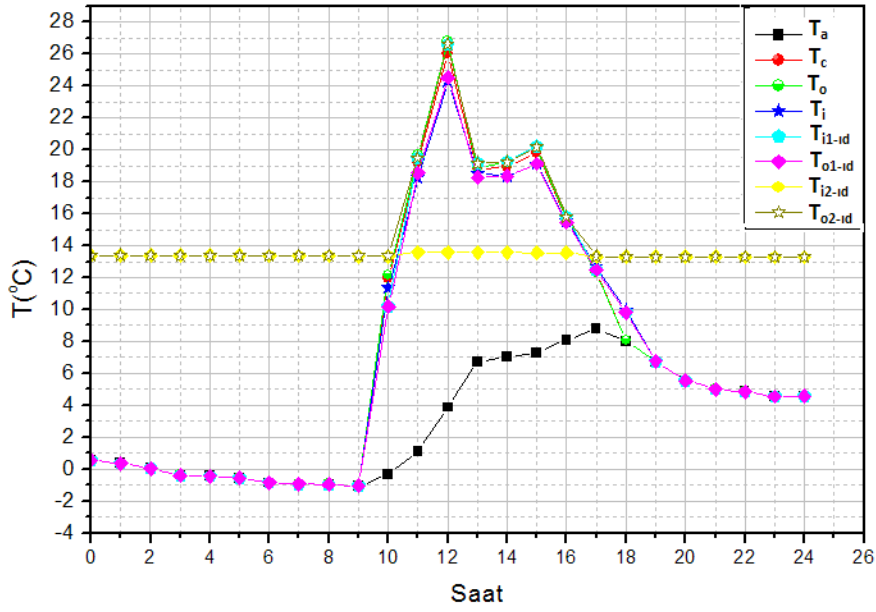
**Şekil 13.** 17 Temmuz için 66 ° eğim açısında PV/T sistemindeki sıcaklık dağılımları.

Şekil 13.'de görüldüğü üzere gün içindeki dağılımlarda; maksimum sıcaklıklar PV/T hücre ortalama sıcaklığı 50.66 °C, şebeke suyunun ısı değiştiricisine giriş sıcaklığı 22.26°C ve ısı değiştiricisinden çıkış sıcaklığı 51.88 °C saat 14:00'de olduğu görülmüştür.

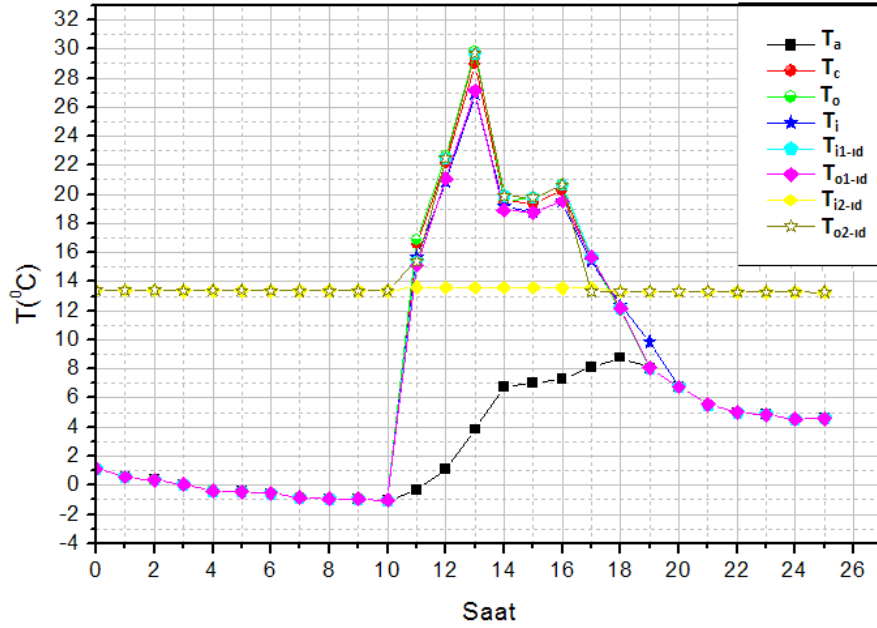
En düşük sistem faydalanma oranı, tüm PV/T eğim açıları Aralık ayında tespit edilmiştir. Bu yüzden hesaplanan her eğim açısı için Aralık ayını temsil eden 10. Gün için sistemdeki sıcaklık dağılımları sırası ile Şekil 14., 15., 16.'da verilmiştir.



**Şekil 14.** 10 Aralık için 16 ° eğim açısında PV/T sistemindeki sıcaklık dağılımları.



Şekil 15. 10 Aralık için 37 ° eğim açısında PV/T sistemindeki sıcaklık dağılımları.



Şekil 16. 10 Aralık için 66 ° eğim açısında PV/T sistemindeki sıcaklık dağılımları.

Gün içindeki dağılımlarda; 16 ° eğim açısında maksimum PV/T hücre ortalama sıcaklığı 21.20 °C, ısı değiştiricisinden çıkış sıcaklığı 21.56 °C saat 12:00'de, 37° eğim açısında maksimum PV/T hücre ortalama sıcaklığı 26.02 °C, ısı değiştiricisinden çıkış sıcaklığı 26.63 °C saat 12:00'de, 66 ° eğim açısında maksimum PV/T hücre ortalama sıcaklığı 28.93 °C, ısı değiştiricisinden çıkış sıcaklığı 29.69 °C saat 13:00'de olarak tespit edilmiştir. Bu esnada şebeke suyunun ısı değiştiricisine giriş sıcaklığı 13.58 °C ve dış hava sıcaklığı 3.86 °C'dir.

## SONUÇ

Bu çalışmada, Kırklareli Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü Hizmet Binasının elektrik ihtiyacı baz alınarak TRNSYS programında tasarlanan ve analiz edilen PV/T sistemi üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır.

Kırklareli Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü Hizmet Binası yıllık elektrik tüketimi 64315 kWh'dir. Yapılan çalışma sonucunda, TRNSYS programında oluşturulan 16° kolektör eğim açılı sistemle yıllık 39417.55 kWh, 37° kolektör eğim açılı sistemde 40485.01 kWh, 66° kolektör eğim açılı sistemde 35683.84 kWh elektrik enerjisi üretilebilmektedir. 16° kolektör eğim açılı sistemle ihtiyacın %61.29'u, 37° kolektör eğim açılı sistemle %62.95'i, 66° kolektör eğim açılı sisteme %55.48'inin karşılanacağı sonucuna ulaşılmıştır. Yaz aylarında, 16° kolektör eğim açılı sistemin elektrik enerjisi ihtiyacının %86'sını karşıladığı, ayrıca yazın kullanım suyu ısıtılmasına, kışında hem kullanım suyu hem de hacim ısıtmasında kullanılan suyunun ısıtılmasında destek sağlayacağı sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar enerji tasarrufu açısından önemlidir.

## KAYNAKLAR

- [1] KARAÇAVUŞ, B., DOĞANAY, H.Ö., " Kırklareli İklim Şartlarında Fotovoltaik/Termal Kollektör Sisteminin Analizi", Enerji ve Çevre Dünyası Dergisi, 115, 48-52, 2015.
- [2] HUANG, B.J., LİN, T.H., HUNG, W.C., SUN, F.S., "Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems", Solar Energy 70, 443–448, 2001.
- [3] TRNSYS17, Programı Kütüphanesi.
- [4] DOĞANAY, H.Ö., " Kırklareli İklim Şartlarında Fotovoltaik/Termal Kollektör Sisteminin Analizi", Yüksek Lisans Tezi, T.Ü., 2014.
- [5] PEREZ, R., STEWART, R., SEALS, R., GUERTİN, T., "The Development and Verification of the Perez Diffuse Radiation Model", Sandia Report, SAND88-7030, 1988.
- [6] DUFFİE, J.A., BECKMANN, W.A., Solar Engineering of Thermal Process ISBN 0-471-51056-4 Wiley-Interscience Publication, New York, 2006.
- [7] OLCAY, K., Güneş Enerjisi Ders Notları II. Bölüm, 2009.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar, "Güneş enerjisinden elektrik üretimi" isimli TÜBAP 2010/77 numaralı projesinde, TRNSYS programının lisanlı olarak alınmasını sağlayan Trakya Üniversitesi'ne teşekkürlerini sunarlar.

## ÖZGEÇMİŞ

### Berrin KARAÇAVUŞ

1970 yılı Edirne doğumludur. 1991 yılında T.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. Aynı Üniversiteden 1995 yılında Yüksek Mühendis ve 2006 yılında Doktor ünvanını almıştır. 1992-2006 Yılları arasında Araştırma Görevlisi, 2007 yılından beri T.Ü. Mühendislik Fakültesi Makina Bölümü Enerji Anabilim Dalı'nda Yrd. Doç. Dr. Olarak görev yapmaktadır. Güneş enerjisi, ısı pompaları, motorlar ve hidrolik makineler konularında çalışmaktadır.

### Hüseyin Özgür DOĞANAY

1982 yılı Sivas doğumludur. 2006 yılında G.Ü. Çorum Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. Trakya Üniversiteden 2014 yılında Yüksek Mühendis ünvanını almıştır. 2010 yılından beri Kırklareli Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü'nde görev yapmaktadır.