



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Derleme

Fotovoltaik-Termoelektrik Hibrit Güç Üretim Sistemlerinde Son Gelişmeler

 Cihan DEMİRCAN ^{a,*},  Ali KEÇEBAŞ ^b  Hilmi Cenk BAYRAKÇI ^c

^a Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, TÜRKİYE

^b Enerji Sistemleri Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla, TÜRKİYE

^c Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Isparta, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: cihandemircan48@gmail.com

DOI: 10.29130/dubited.1074371

ÖZ

Fotovoltaik (PV) modüllerin en küçük birimini oluşturan güneş gözeleri güneş enerjisini doğrudan elektriğe dönüştürürler. Ancak dönüştürülen elektrik enerjisi gelen enerjinin %13 ile %20'si arasında değişmektedir. Gelen güneş enerjisinin bir kısmı geri yansımakta geri kalanı ise termal enerjiye dönüşmektedir. Bu nedenle PV modül sıcaklıkları yükselmekte ve PV modüllerin verimleri düşmektedir. Güneş enerjisinden üretilen gücü arttırmanın yollarından biri PV modül sıcaklığını termoelektrik (TE) jeneratörler yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürmektir. Bu çalışmada PV – TE güç üretim sistemlerinde yapılan seksen farklı literatür çalışması derlenmiştir. PV-TE sistemler beş grupta sınıflandırılmıştır. Bunlar geleneksel, yoğunlaştırılmalı, faz değiştiren malzeme entegreli, ekonomik değerlendirmeler ile güç düzenleme ve kaydetme birimleridir. Özetle geleneksel PV-TE sistemlerdeki sıcaklık ve güç sınırlamalarını ortadan kaldırmak için yoğunlaştırılmış sistemlere geçiş olduğu görülmekle birlikte ve yeni teknikler geliştirilmeye çalışılmaktadır. PV-TE sistemlerin performansı geleneksel PV sistemlerden iyi olsa bile TE modül maliyetinin yüksek olması ve düşük verimliliği bu sistemlerin rekabetçi olmasını kısıtlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Güneş Enerjisi, Fotovoltaik, Termoelektrik, Güç Üretimi

Recent Developments of Photovoltaic-Thermoelectric Hybrid Power Generation Systems

ABSTRACT

Solar cells directly convert solar energy into electricity and are a small unit of photovoltaic (PV) modules. However, energy conversion changes between 13% and 20% from solar energy. Incoming solar energy reflects from the surface and the rest of the solar energy converts to thermal energy. So, PV module temperature rises and efficiency decreases. One of the increasing of electricity from solar energy is utilization of PV module temperature together with thermoelectric (TE) generators. In this study, eighty different publications in literature were reviewed about PV-TE hybrid power generation systems. PV-TE system was classified in five groups. These are conventional, concentrated, phase change material integrated, economic perspectives and power conditioning units. In briefly, concentrated PV-TE system is alternative to remove of the temperature and power limitations of conventional PV-TE system and try to novel techniques of these limitations. However, even if PV-TE system performance is better

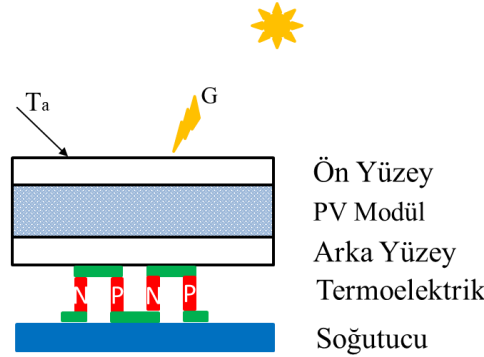
than conventional PV system, high costs and low efficiency TE modules are restricted to competitive becoming of PV-TE systems.

Keywords: Solar Energy, Photovoltaic, Thermoelectric, Hybrid Power Generation

I. GİRİŞ

Güneş enerjisinin mevsimsel, günlük ve anlık değişimleri güneş enerjisinin etkin kullanımının önemini arttırmaktadır. Güneş enerjisinden elektrik üretiminde güneş gözelerinin çevre dostu olması, hareketli parçasının bulunmaması ve kolaylıkla entegre edilerek küçük güçlü sistemlerden büyük sistemlere dönüştürülmesi, binalarda ve kırsal kesimlerde enerji tüketimini karşılaması son yıllarda güneşten elektrik üretiminin ilgi odağı olmuştur.

Fotovoltaik (PV) modüllerin en küçük birimini oluşturan güneş gözeleri güneş enerjisini doğrudan elektriğe dönüştürürler. Ancak dönüştürülen elektrik enerjisi gelen enerjinin %13 ile %20'si arasında değişmektedir. Gelen güneş enerjisinin bir kısmı geri yansımakta geri kalanı ise termal enerjiye yani sıcaklığa dönüşmektedir. Bu nedenle PV modül sıcaklıkları yükselmekte ve PV modüllerin verimleri düşmektedir. Verimliliği arttırmak ve daha fazla güç elde etmenin yolu PV modüllerin soğutulmasıdır [1,2]. Termoelektrik (TE) cihazların PV modüller gibi hareketli parçalarının olmaması ve sıcaklıktan elektrik üretebilmesi son yıllarda PV-TE hibrit sistemleri ön plana çıkarmıştır. Bu sistemlerde TE malzemeler sıklıkla PV modül sıcaklığını elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılmaktadır. Şekil 1'de basit bir PV-TE güç üretimi sistemi şekli verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi PV modüllerin arka tarafından alınan sıcaklık TE modüllerin sıcak tarafına aktarılır. TE modüllerin soğuk tarafı ile sıcaklık farkı oluşturulur. Bu sıcaklık farkı sayesinde TE modüllerden elektriksel güç elde edilir. Böylece güneş enerjisinden üretilen güç miktarı artırılarak güneş enerjisi daha verimli kullanılır.



Şekil 1. PV-TE güç üretim sistemi kesiti

Fotovoltaik enerji dönüşüm sistemlerinde enerji performansını etkileyen önemli faktörlerden biri çevresel parametrelerdir. Başlıca etkileyen çevresel parametreler; güneş ışınımı (G), çevre sıcaklığı (T_a) ve rüzgar hızıdır. Belli çevresel şartlarda PV modüllerin verimi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\eta_{PV} = \eta_{ref}(1 - \gamma(T_{PV} - 25)) \quad (1)$$

Burada η_{ref} ifadesi referans alınan verim değeridir ve standart test koşullarındaki (1000 W/m^2 , $25 \text{ }^\circ\text{C}$) güç değerine göre hesaplanır. γ ifadesi ise PV modülün güç/sıcaklık katsayısıdır. Bu katsayı kristalli PV modüller için %0.45 ve amorf PV modüller için ise %0.25 alınır [3]. T_{PV} ise PV modül sıcaklığını gösterir. Belirli bir güneş ışınımı (G) ve T_{PV} modül sıcaklığında PV modülün üretebileceği güç aşağıda verilmiştir.

$$P_{PV} = GA\eta_{PV} \quad (2)$$

TE modüllerin yüzeyleri arasında bir sıcaklık farkı oluşturulduğunda; Termodinamiğin II. Kanunu gereğince ısı sıcak yüzeyden soğuk yüzeye doğru transfer edilecek ve bu durumda TE jeneratör uçlarında bir DC gerilim düşümü olacaktır. TE jeneratör uçlarına harici bir yük bağlanırsa, yük üzerinden bir I akımı geçişi olur. TE jeneratörden elde edilen P gücü veya I akımı; ΔT sıcaklık farkına, yarıiletken materyallerin özelliklerine ve harici RL yük direncinin değerlerine bağlıdır. Elektrik enerjisi, ısı transferine bağlı olarak TE yarıiletkenler boyunca elektriksel yük taşıyıcıların hareketinden üretilmektedir.

TE jeneratörlerin performans değerlerinin artırılması için TE jeneratörlerin termal direncinin artırılması, TE jeneratör bloğunu oluşturan soğutucu sisteminin ısı giriş-çıkış termal dirençlerinin düşürülmesi ve termoelementler arasındaki kontak elektrik dirençlerinin minimize edilmesi gerekmektedir [4].

TE jeneratörlerden elektrik enerjisi üretimi Seebeck etkiye dayanır. Seebeck etkisi sıcaklık farkının doğrudan elektrik akımına dönüşümü olarak bilinir. TE jeneratörü yüzeyleri arasında ne kadar yüksek sıcaklık farkı olursa o oranda elektrik enerjisi üretimi artar. Bu sıcaklık farkı kullanılan kaynağa göre değişkenlik gösterdiğinden sabit gerilim elde edebilmek amacıyla gerilim düzenlemesine ihtiyaç duyarlar.

Termoelektriklerde en yüksek seviyede verim elde edebilmek için “Z” değerini olabildiğince yüksek tutmak gerekmektedir. Bu da aşağıdaki eşitlikte görüldüğü gibi elektriksel direnci yüksek yani elektriksel iletkenliği (ρ_{TE}) düşük, termal iletkenliği (k_{TE}) düşük, Seebeck katsayısı (α_{TE} - birimi ise V/K) yüksek malzemeler kullanılmasını gerekli kılar;

$$Z = \frac{\alpha_{TE}^2}{k_{TE}\rho_{TE}} \quad (3)$$

Bir TE jeneratörde kullanılan yarıiletken güç ölçümü, kalite faktörü (ZT) olarak da ifade edilir. Bu faktörde denklem 3’te verilen eşitliğin her iki tarafı T sıcaklığı ile çarpılır. TE jeneratörün Carnot verimliliği ise;

$$\eta_{max} = \frac{T_H - T_C}{T_H} \frac{\sqrt{1 + ZT_{AVE}} - 1}{\sqrt{1 + ZT_{AVE}} + \frac{T_C}{T_H}} \quad (4)$$

burada; T_H ; TE jeneratörün sıcak taraf sıcaklığı, T_C ; TE jeneratörün soğuk taraf sıcaklığı ve T_{AVE} ; TE jeneratörün ortalama $(T_H + T_C)/2$ sıcaklığıdır. Tek bir termoelektrik modüle bağlı yük R_L üzerinde üretilen güç P_L ifadesi ise;

$$P_L = \alpha_{TE}^2 \Delta T_{TE}^2 \frac{R_L}{(R_{IN} + R_L)^2} \quad (5)$$

burada, P_L ; TE jeneratörün yük üzerinden elde edilen çıkış gücü, R_L ve R_{IN} ise yük ve iç direncini gösterir. Yük direnci TE jeneratörün iç direncine eşit olduğunda, TE jeneratörün maksimum çıkış gücü ürettiği yük karşılaşma durumu oluşur ve alınacak maksimum güç P_{Lmax} değeri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$P_{Lmax} = \frac{\alpha_{TE}^2 \Delta T^2}{4R_{IN}} \quad (6)$$

Fotovoltaik ve Termoelektrik modül teknolojilerinin güç ifadeleri yukarıda sunulmuştur. Daha önce bahsedildiği gibi PV modül sıcaklığından doğan atık ısı TE modüller yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülerek güneş enerjisinden $P_{PV} + P_{TE}$ kadar güç üretimi gerçekleştirilir. Bu sayede güneş enerjisinin daha verimli kullanılır.

Bu çalışmada PV-TE hibrit güç üretim sistemleri üzerine yapılan araştırmalar ve elde edilen bulgular sunulmuş ve değerlendirilmiştir. Başlıca ele alınan konuların sınıflandırılması düzlemsel PV-TE sistemler, yoğunlaştırılmış PV-TE sistemler, PV-TE sistemlerde faz değiştiren malzeme (FDM) kullanımı, PV-TE güç üretimi için ekonomik değerlendirmeler, PV-TE güç düzenleme ve görüntüleme birimleri şeklinde sunulmuştur.

II. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI

Bu bölümde PV-TE hibrit güç üretim sistemlerine ait yapılan çalışmalar ve elde edilen bulgulara yer verilmiştir. Bölüm A’da düzlemsel PV-TE güç üretim sistemleri, Bölüm B’de yoğunlaştırılmış PV-TE güç üretim sistemleri, Bölüm C’de PV-TE güç üretim sistemlerinde faz değiştiren malzeme (FDM) kullanımı, Bölüm D’de PV-TE güç üretimi için ekonomik değerlendirmeler ve Bölüm E’de PV-TE güç düzenleme ve görüntüleme birimleri hakkında literatürde yapılan çalışmalar verilmiştir.

A. DÜZLEMSEL PV-TE GÜÇ ÜRETİM SİSTEMLERİ HAKKINDA YAPILAN ÇALIŞMALAR

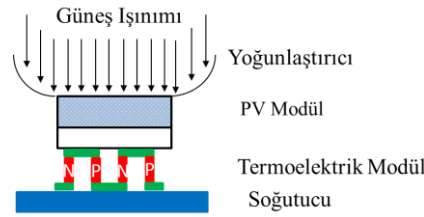
van Sark [5] PV-TE güç üretim sisteminin verimliliğini tahmin etmek için basit bir model türetmiştir. Türetilen bu model ile iki farklı ışınım ve sıcaklık özellikleri olan yerlerde güç, verim ve yıllık enerji üretimi tahmini yapmıştır. Elde edilen sonuçlara göre termoelektrik malzemeler enerji üretimi artışında %14,7 ve verimlilik artışında ise %23 seviyelerine kadar katkı sağladığı görülmüştür. Yeni bir termoelektrik malzemenin geliştirilmesi ile bu değerlerin %50’lere ulaşacağını bildirmiştir. Yang ve Yin [6] PV-su ısıtıcı sistemle PV-TE- su ısıtıcı sistemin verimlilik ve güç analizini gerçekleştirmiştir. Farklı ışınımlarda su akışı olduğu ve olmadığı durumlardaki davranışı incelemiştir. Su akışı olmadığı durumlarda TE çıkış gücü m^2 başına $4 W$ ’ın altında iken su akışı sağlandığında ışınım değerlerine göre m^2 başına $5 W$ ile $10 W$ arasında değiştiği görülmüştür. Su ısıtıcı sistemin soğutma özelliği sayesinde standart PV sistemde verimin %30-%50 arasında PV-TE sistemin ise %25-%40 arasında iyileştirme gösterdiği söylenmiştir. Deng vd., [7] ince film PV-TE bir sistemde soğurucu, iletim ve yalıtım katmanları yerleştirmiştir. Sonlu elemanlar metodu ve deneysel olarak yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Önerilen PV-TE sistemin diğer çalışmalardan daha üstün olduğu ve güç çıkışında %107,9 artış sağladığı kanıtlanmıştır. Lin vd., [8] tarafından gerçekleştirilen PV-TE sistem ile ilgili sayısal analiz çalışmasına göre termoelektrik malzemelerin ısıl iletkenliğinin düşük ve Seebeck katsayısının yüksek olması gerektiği vurgulanmıştır. Dong vd., [9] PV-TE sistemdeki ısı iletimi olayında ayrıştırılmış düğüm sıcaklıkları arasında zamana bağımlı bağlantı gerçekleştirmiş ve günlük sıcaklık değişimini tahmin etmiştir. Elde edilen bulgulara göre Seebeck katsayısının ve termal iletkenliğinin yükselmesi durumunda termal verimdeki artışın bir miktar fazla olacağı görülmüştür. Bjørk ve Nielsen [10] tarafından yapılan bir çalışmada üç farklı PV modül teknolojilerine (p:Si, a:Si, CIGS ve CdTe) entegre edilen TE modüllerin güç ve verimlilik analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar amorf PV (a:Si) modüllerde verim artışı diğerlerine göre biraz daha az olduğunu göstermiştir. Lorenzi vd., [11] tarafından incelenmiştir. PV yüzeyine gelen güneş ışınımının $1000 W/m^2$ değeri için maksimum termal güç aralığının PV malzeme seçimine bağlı olduğu ve $380 W/m^2$ ’den (tek kristalli) $130 W/m^2$ ’ye (amorf) kadar mümkün olduğu bildirilmiştir. Kossyvakis vd., [12] deneysel olarak çok kristalli ve boya duyarlı PV hücreleri ile TE jeneratörlerin tek bir hibrit sistemde çalışma performansını incelemiştir. Çok kristalli sistemde iyileşmenin %22,5 değerlerinde görülürken; boya duyarlı sistemde %30,2 değerlerinde olduğu gözlemlenmiştir. Attivissimo vd., [13] Avrupa’nın 6 farklı şehri (Pachino, Taranto, Roma, Turin, Glasgow, Stockholm) için PV-TE sistemin aylık fizibilite çalışmasını sunmuştur. Sıcak ülkelerde sistem enerji performansının daha iyi gözlemlendiği ve enlem değerinin TE performansını etkilediği bildirilmiştir. Rezania vd. [14] PV-TE hibrit sistemlerin performansını incelemek ve doğal taşınım, zorlamalı taşınım ve ışınım etkisini tahmini için termal model tasarlamıştır. Üç farklı Avrupa ülkesi için PV-TE sistemin performansı değerlendirilmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki termoelektrik modüllerin etkisi çok küçüktür. Termoelektriğin katkısının ancak malzeme özellikleri geliştirildiğinde ve optimize edildiğinde artacağı bildirilmiştir. Hashim vd., [15] su soğutmalı PV-TE güç üretim sisteminin geometrik optimizasyonunu

gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmada TE modülün uzunluğuna göre çıkış gücü tahmin edilmiştir. Termoelektrik modül uzunluğu optimum 2 mm için güç verimliliğinin %10'dan %10,2'ye yükseldiği sonucuna ulaşılmıştır. Kwan ve Wu [16] PV modül arkasına tek ve iki düzeyli TE jeneratörün optimizasyonu ve karşılaştırılması için genelleştirilmiş termodinamik model geliştirmiştir. Geliştirilen model ile 3 farklı TE malzemeli PV-TE sistemin çok amaçlı optimizasyon çalışması sunulmuştur. Termoelektrik malzemede 270 K ile 320 K sıcaklık aralığında Bi_2Te_3 malzemesinin daha uygun olduğu gözlenmiştir. Optimal performans açısından bakıldığında ise tek düzeyli TE jeneratörün çift düzeyliden daha faydalı bildirilmiştir. Zhu vd., [17] PV-TE sistemde TE modülün soğuk tarafında optimize edilmiş termal yönetim çalışması gerçekleştirmiştir. Deneysel ve teorik çalışmada önerilen sistemde büyük sıcaklık farkının elde edilmesi sayesinde PV-TE verimi %23 değerlerine ulaşmıştır. Tek bir PV modüle göre önerilen sistem %25 daha verimlidir. Cotfas vd., [18] tek ve çok kristalli PV-TE hibrit güç üretim sistemlerinin çevresel şartlardaki ve su akışı durumundaki karakteristiğini incelemiştir. Tek kristalli hibrit sistemin en iyi performansı gösterdiği bildirilmiştir. Su akışının sıcaklığı azaltması sayesinde PV gücünün %11'den daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Soltani vd., [19] standart bir PV-TE sistemde TE modüllerin soğuk tarafının soğutulmasında nanoakışkanların etkisini incelemiştir. Deneysel çalışmada sistemin doğal taşınım, zorlamalı taşınım, su soğutmalı Fe_3O_4 -su nanoakışkan ve SiO_2 -su nanoakışkan kullanarak performans karşılaştırması yapmıştır. Doğal taşınımı temel alarak sistem karşılaştırılması yapıldığında en iyi performans SiO_2 -su nanoakışkanı tarafından %8,26 daha fazla güç üretimi ve %3,335 verim artışı sağlanmıştır. Marandi vd., [20] oyuk tipi alıcılı PV-TE güç üretim sistemi tasarlamıştır. PV modüller oyuğun iç kısmına ve TE modüllerin soğuk tarafı dış kısmına gelecek şekilde tasarlanan sistemin deneysel olarak incelenmiştir. Önerilen sistemin tepe veriminin sabah saatlerinde yaklaşık %22'ye ulaştığı ve geleneksel PV sisteme göre yaklaşık %19 daha verimli olduğu görülmüştür. Li vd., [21] mikro kanallı ısı borulu PV-TE sistemin deneysel çalışmasını gerçekleştirmiştir ve standart bir PV modül ile karşılaştırmıştır. Standart bir PV modülün yaz aylarındaki verimliliği %13,6 iken önerilen sistemin %14 olduğu görülmüştür. Bu az miktardaki artışın mikro kanallı ısı borusunun termal direncinden kaynaklandığı söylenmiştir. Ayrıca önerilen sistem için güç ve verimlilik artışı olsa dahi termoelektrik modüllerin maliyeti fazla olduğu için sistemin yüksek maliyetli olduğu da vurgulanmıştır. Mikro kanallı ısı borulu PV-TE sistemle ilgili yapılan başka bir deneysel çalışmada sistemin enerji ve ekserji analizi gerçekleştirilmiştir [22]. Isı borusunun arka kısmının yalıtım etkisi dikkate alınmıştır. Termal verimliliğin %56,57 ile %69,53 arasında değiştiği görülmüştür. Yalıtımın ise sıcaklık artırıcı etkisinden dolayı termal verimliliği arttırsa bile elektriksel verimliliği ve güç değerini azalttığı görülmüştür. Huen ve Daoud [23] hibrit PV-TE güç üretiminde PV ve TE malzemelerinin durumuna dair bir derleme çalışması sunmuştur. Gelecek nesil PV-TE sistemlerin esnek olabilmesi için kaplama teknolojileri kadar esnek PV ve TE malzemelerin geliştirilmesinin önemini bildirmiştir. Ayrıca yüksek yoğunlaştırma oranına sahip çok eklemli PV ile Bi_2Te_3 TE modüllerde en yüksek dönüşüm verimliliğinin %32,09'a ulaştığı bildirilmiştir. Cui vd., [24] parçalı (segmented) termoelektrikli PV-TE sistemin performans değerlendirmesini ve ömür tahminini analiz etmiştir. Yapılan analiz için sayısal model geliştirilmiştir. Tek katmanlı bizmut-tellürit (Bi_2Te_3) ve kurşun-tellürit (PbTe) malzemeli TE modül için elde edilen sonuçlar ile bu iki malzemeden türetilen parçalı TE sistemin performansını karşılaştırmıştır. Farklı yoğunlaştırma miktarlarına göre elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki parçalı TE sistemin standart TE sistemlerden daha fazla miktarda güç çıkışı sağlamaktadır. Pasif ve aktif soğutmalı bir PV-TE sistemin enerji performansı üç farklı ülke için yapılan bir çalışmada [25] pasif soğutmanın performans kaybını aykırı oranda dengelerken aktif soğutmanın önemli ölçüde dengelediği gözlemlenmiştir. Radyatif soğutmalı bir PV-TE sistemin karanlık koşullardaki davranışı Zhao [26] tarafından gerçekleştirilmiştir. Gece süresi boyunca ortalama çıkış geriliminin 9 mV ölçüldüğü ve karanlıktan elektrik enerjisinin üretilebildiği kanıtlanmıştır. Khan vd., [27] 10 W gücündeki p-Si PV modüldeki sıcaklığın TE modüller yardımıyla soğutarak deneysel performans analizi yapmıştır. PV modül sıcaklığının 55 °C'den 52 °C'ye düştüğü; gücün 8,78 W'tan 10,84 W'a yükseldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca hibrit sistemin verimliliğinin %11,6'dan %14 değerine çıktığı ve sadece bir PV modüle göre %17'lik verim artışı sağladığı vurgulanmıştır. Kidegho vd., [28] PV-TE sistemde sıcaklık uyumsuzluk durumlarında farklı termal arayüz malzemelerinin sistem performansına etkisini incelemiştir. Yüksek sıcaklıklardaki PV hücrenin soğutulmasında ısı yayıcı malzemelerin hava soğutmada %19,7 ve su soğutmada % 24,85 ek güç sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca mevcut diğer termal arayüz malzemelerini incelemede fırsat verilmiştir ve toplam kazancın su soğutmalı için %27,5 değerine ulaştığı görülmüştür. Ruzaimi vd., [29] bir sera sisteminde PV

modüllerde sıcaklık dağılımının homojen olmadığı durumdaki PV-TE sistemin performansını değerlendirmiştir. Sıcaklık farklılığının oluşmasının sistemdeki ortalama güç düşüşünü %33 etkilediği görülmüştür. Demircan [30] PV ve PV-TE sistemin homojen ve homojen olmayan koşullarda karşılaştırmasını yapmıştır. Homojen olmayan durumda 916 W/m^2 'de standart PV sistem $20,29 \text{ W}$ güç üretirken PV-TE sistemde PV modüller $19,92 \text{ W}$ ve TE modüller $1,24 \text{ W}$ güç üreterek toplam %4,28 güç artışı sağlayarak $21,16 \text{ W}$ güç üretimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre standart PV sistemde modüllerdeki farklılık yaklaşık $5 \text{ }^\circ\text{C}$ iken PV-TE sistemde bu fark $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den azdır.

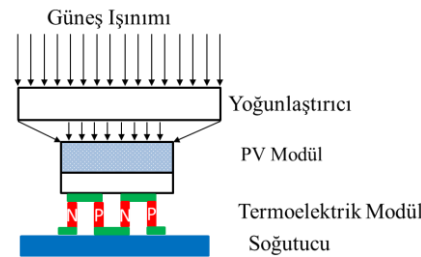
B. YOĞUNLAŞTIRILMIŞ PV-TE GÜÇ ÜRETİM SİSTEMLERİ HAKKINDA YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bir önceki bölümde düzlemsel PV-TE güç üretim sistemlerine ait yapılan çalışmalar ve elde edilen bulgular sunulmuştur. PV ve TE modüllerin verimlerinin düşük olması güç üretimini de düşük düzeyde tutmaktadır. Güç üretimini arttırmanın yollarından biri modül yüzeylerine gelen güneş ışınım miktarlarını arttırmaktır. Bu sayede güç üretimi ve modül sıcaklıkları artar. Bu sistemler yoğunlaştırılmış PV sistemler olarak bilinir. Yoğunlaştırılmış PV (CPV) sistemler yoğunlaştırma oranı miktarına göre düşük yoğunlaştırılmalı ve yüksek yoğunlaştırılmalı sistemler olarak sınıflandırılabilir. Düşük yoğunlaştırılmalı sistemlere ait CPV-TE sistem örneği Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi PV modüllerin etrafına aynalar ya da yansıtıcılar eklenerek toplam alana gelen güneş ışınımı PV modül alanına yansıtılır. Böylece PV modüllerin üzerine gelen güneş ışınımı arttırılarak daha fazla enerji sağlanır. PV modüllerdeki sıcaklık artışı ile birlikte TE modüllerden de elde edilen güç bir miktar artmaktadır. Bu sayede CPV-TE sistem düzlemsel PV-TE sistemlere göre güneş enerjisini daha etkin kullanır.



Şekil 2. Düşük yoğunlaştırılmalı CPV-TE sistem

Yüksek yoğunlaştırılmış PV sistemlere ait gösteri ise Şekil 3'te sunulmuştur. Bu sistemlerde özellikle güneş gözesinin alanı düşük, yoğunlaştırıcı yüzeyin alanı yüksek tutulmaya çalışılır. Bu sayede yoğunlaştırıcı yüzey alanının PV yüzey alanına oranı kadar güneş enerjisi yoğunlaştırılır. PV yüzey alanına gelen toplam ışınımın artması ile daha fazla güç üretebilmek için enerji verimi yüksek PV hücrelerin kullanılması ile sağlanabilmektedir. Bunun için özellikle üç eklemlili güneş gözelerinin kullanılması popüler olmuştur. Bu bölümde CPV-TE sistemlere yapılan çalışmalar ve elde edilen bulgular sunulmuştur. CPV-TE sistemlere ait performans değerlendirmeleri, optimum çalışma koşulları, TE modüllerin katkısı hakkında bilgiler verilmiştir.



Şekil 3. Yüksek yoğunlaştırılmalı CPV-TE sistem

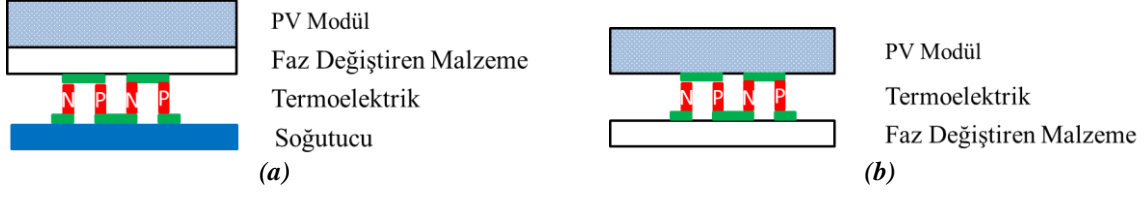
Vorobiev vd., [31] yüksek sıcaklıklarda yoğunlaştırılmış PV sistemde TE kullanımını, bant aralığının analizini ve ZT değeri 1, 2 ve 4 değerine ait TE kullanımındaki sistem verimlerini incelemiştir. Uygun bant aralığında CPV-TE sistemin toplam verimliliğinin %30 değerlerinde olduğu ve TE modüllerin yaklaşık %5 ile %10 arasında verim artışı sağladığı görülmüştür. Liao vd., [32] düşük yoğunlaştırılmalı CPV-TE sistemin elektriksel parametrelerin performans karakteristiğini incelemiştir. Elde edilen bulgular göstermiştir ki; hibrit sistemin genel performansında bazı önemli parametrelerin (yoğunlaştırma oranı, ZT değeri vb.) optimum kriterinin değerlendirilmesi gerekmektedir ve optimal tasarım için faydalı olacaktır. Beerl vd., [33] ticari çok eklemli PV modül ile TE jeneratörün yaklaşık olarak 300 değerinde yüksek yoğunlaştırma oranına kadar deneysel ve teorik çalışmasını gerçekleştirmiştir. Hibrit sistemin verimliliğinin yaklaşık %32'ye ulaştığı ve TE modülün 300 yoğunlaştırma oranı için %20 katkı sağladığı görülmüştür. Ayrıca sonlu elemanlar analizine göre TE jeneratörün Peltier ile soğutulması durumunda ve yoğunlaştırma oranının 200 olduğu seviyelerde bu katkının %40'a ulaşacağı gözlemlenmiştir. Lamba ve Kaushik [34] CPV-TE sistem için analitik model geliştirmiştir. PV modülde ısı transfer olayları ve TE modül kısmında Thomson, Seebeck, Joule ve Fourier etkileri dikkate alınmıştır. Elde edilen bulgular göstermiştir ki hibrit sistem tek bir PV modülden daha fazla güç üretmektedir. Yüksek yoğunlaştırma oranlarında ise Thomson etkisi daha baskındır. Zhang ve Yuan [35] yüksek yoğunlaştırma oranlı CPV-TE sistemde çok katmanlı termal direnç modeli kullanarak termal direncin etkisini incelemiştir. Termal direnci azaltmanın önemli bir kriter olduğu vurgulanırken; bakır levha kullanmanın termal direnci azaltması sayesinde hibrit güç üretiminin 25,7 W'tan 26,6 W'a yükseldiği görülmüştür. Diğer bir çalışmada Yin vd., [36] CPV-TE sistemde termal direnç analiz ve optimizasyon çalışmasını sunmuştur. Yoğunlaştırma oranının dört farklı PV modüldeki (a:Si, p:Si, c:Si ve polimer) verime etkisi, doğal soğutma, fan soğutma ve su soğutma durumlarında verim ve sıcaklık değişimleri incelenmiştir. Düşük sıcaklık katsayılı ve yaklaşık %18 verimlilik ile pervoksit güneş hücresine sahip CPV-TE sistemin değerlendirilmesi Zhang et al., [37] tarafından sunulmuştur. Tek bir PV hücrenin verimliliği %17,6 iken önerilen hibrit sistemin %18,6 olduğu gözlemlenmiştir. Yoğunlaştırma oranı arttıkça hibrit sistemin verimliliğinin %16 değerlerinin altına düştüğü bildirilmiştir. Contento vd., [38] a:Si ve Cu_2ZnSnS_4 (CZTS) güneş hücrelerinde TE modülün sıcak tarafında optik yoğunlaştırılmalı sistem kullanarak verimliliği arttırmaya yönelik bir çalışma sunmuştur. Önerilen teknik sayesinde verimlilik artışının a:Si ve CZTS hücreler için sırasıyla %57 ve %35 değerlerinde olduğu gözlemlenmiştir. Willars-Rodríguez vd., [39] Si ve CdTe güneş hücreli Fresnel yoğunlaştırılmalı CPV-TE sistem için deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. TE jeneratörlerin verimliliği kış mevsiminde %2,5 iken yaz mevsiminde %3,5 değerindedir. Hibrit sistemin elektriksel verimliliği %20 ve termal verimliliğinin ise %40 değerlerindedir. Li vd., [40] CPV-TE sistem için bir boyutlu model önermiştir. Önerilen model ile dört farklı PV modül (c:Si, p:Si, CIGS ve polimer) göz önünde bulundurularak hibrit sistemin enerji ekserji analizi gerçekleştirilmiştir. Ekserji kayıplarının c:Si modüllü CPV-TE sistemde daha fazla görülürken; CIGS PV modüllü hibrit sistemin ekserji kaybının daha az olduğu, %21 değerlerinde elektriksel verimlilik sağladığı ve polimer CPV-TE sistemin %6,6 daha fazla sağladığı bildirilmiştir. Li vd., [41] verimli CPV-TE sistem için birincil sınır şartlarının analizini gerçekleştirmiştir. Daha geniş bir kesit alanı ile genel verimlilik daha yüksektir ve yoğunlaştırma oranı veya soğuk taraf sıcaklığı sabit olduğunda TE'nin yüksekliği daha düşüktür. Gerçek uygulamada ise yüksek maliyetlerden dolayı kesit alanının düşük tutulduğu da bildirilmiştir. Zhou vd., [42] CPV-TE sistemin nanoyapılı ön yüzeyin ışınım soğurmasını incelemek için Monte Carlo ve Zaman Alanlı Sonlu Fark metodlarını birleştirmiştir. Hibrit sistem için önerilen yaklaşım sayesinde soğurulan güneş ışınımının homojen dağılımlarında iyileştirme sağladığı ve ayrıca düzlemsel yüzeye göre 1,6 kat daha fazla ışınım soğurarak yaklaşık $7645 W/m^2$ 'ye ulaştığı görülmüştür. GaAs modül tabanlı CPV sistemde geleneksel bir TE modülün kullanımının ve yoğunlaştırma oranının etkisi üzerine yapılan bir çalışmada optimum verim için yoğunlaştırma miktarının önemli olduğu ve hibrit sistemin %3 daha fazla miktarda verim artışı sağladığı görülmüştür [43]. Soltani vd., [44] parabolik oluklu PV-TE sistemin performansını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Elde edilen bulgular göstermiştir ki deneysel verilerle sayısal olarak elde edilen sonuçlar örtüşmüştür. PV modülden üretilen gücün 20 W değerinden fazla iken TE modülden yaklaşık 2,3 W olduğu gözlemlenmiştir. Ancak PV verimliliğinin %4 ile %8 arasında olduğu, PV modüllerin çok düşük verimlilikte çalıştığı gözlemlenmiştir. Geleneksel CPV-TE sistemlerin aksine Hajji vd. [45] PV modül arkasına optik yoğunlaştırıcı kullanarak TE jeneratörlerin sıcak tarafına gelen sıcaklığı arttırmaya yönelik bir çalışma sunmuştur. PV ile TE modüller arasında doğrudan bağlantı olmayan optik yoğunlaştırılmalı sistemin matematiksel modellemesini

gerçekleştirmiştir. Farklı çalışma koşullarında PV ve TE modüllerin verimlilikleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki önerilen teknik genel verimliliği önemli derecede iyileştirmektedir. Mahmoudinezhad vd., [46] CPV-TE hibrit güç üretim sisteminin her katmanına ilişkin enerji denge denklemlerini göz önünde bulundurarak zamana bağlı geçici durum analizini yapmıştır. Geliştirilen metot ile güneş ışınımı değişimi durumlarında hibrit sistemin geçici cevabı değerlendirilmiştir. Güneş ışınımının artışı; sıcaklık artışından dolayı PV güç üretimini azaltmakta iken TE modüllerde sıcaklık farkının artmasından dolayı TE güç üretimini arttırmakta olduğu görülmüştür. De-la-Vega vd., [47] CPV-TE hibrit güç üretiminde kesirli türeve dayalı performans analizi yapmıştır. Riemann-Liouville kesirli türeve dayalı sunulan performans analizinde; sistem sıcaklıkları ve verimlerin tahminindeki hataların az olması önerilen sayısal metodun doğrulunu kanıtlamıştır. Yin vd., [48] yoğunlaştırılmış, su soğutmalı PV-TE sistemin bir günlük performans tahmini için bir boyutlu termal model türetmiştir. Optimum yoğunlaştırma oranının yaklaşık 12 olduğu durumda ortalama verimliliğin %16,65 olduğu sonucuna varılmıştır. Su hızı ve debisinin de verimlilikte pozitif etkisi olduğu görülmüştür. Yin vd., [49] Fresnel yoğunlaştırılmalı CPV-TE güç üretim sisteminin yüksek verimlilikte çalışması için optimum tasarım çalışması sunmuştur. Optimum tasarımda modül sıcaklık katsayısı, termal direnç, PV hücre sıcaklığı ve verimliliği göz önünde bulundurulmuştur. Elde edilen bulgulara göre PV hücre sıcaklık katsayıları veya referans verimliliği yüksek olması durumunda daha verimli TE jeneratör kullanılması gerektiği; TE termal direnci ayarlanmanın hibrit sistemin çalışmasını optimum sıcaklık dağılımında tuttuğu söylenmiştir. Yin vd., [50] yoğunlaştırılmış, su soğutmalı PV-TE sistemin deneysel optimizasyon çalışmasını gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada akım, gerilim, güç, yük direnci ve bağlantı durumlarına göre değerlendirmeler yapılmıştır. Maksimum güç noktasında PV gerilimi 0,61 V iken PV gücünün 1,19 W, TE gücünün ise 0,33 W olduğu gözlemlenmiştir. CPV-TE sistemin seri bağlantıda bir miktar daha fazla güç ürettiği görülmüştür. Rodrigo vd., [51] kanatçıklı, pasif soğutmalı CPV-TE sistemde CPV modül sıcaklığının ve TE modülün ZT değerinin düşük ve yüksek olduğu dört farklı duruma göre CPV-TE sistemin yıllık enerji analizini gerçekleştirmiştir. Maksimum artışın sağlandığı yüksek sıcaklık ve yüksek ZT değerine sahip CPV-TE sistemin standart çalışma şartlarında küresel verimlilikte %4,75 ve yıllık ortalama olarak ise %4,30 artış sağlayabildiği gözlemlenmiştir. Fresnel lensli, nano yapılı TE malzemeli bir CPV-TE sistemin çok amaçlı optimizasyon çalışmasında dört farklı modele göre sistem çıkış gücü ve verimliliği incelenmiştir [52]. CPV modülün maksimum güç noktasında çalışma durumuna göre seçilen modellerde maksimum güç üretim değeri 461,12 W iken; maksimum verimin %11,45 değerinde olduğu görülmüştür. PV-TE sistemlere ait yapılan bir derleme çalışmasında yoğunlaştırma oranının artmasının TE modül verimliliğini arttırsa bile bunun verimli soğutucu ile mümkün olduğu bildirilmiştir [53].

C. PV-TE GÜÇ ÜRETİM SİSTEMLERİNDE FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME KULLANIMI HAKKINDA YAPILAN ÇALIŞMALAR

Son zamanlarda PV ve TE modüllerin faz değiştiren malzemelerle (FDM) pasif soğutulmasına ilişkin çalışmalar yapılmıştır. FDM'in yenilenebilir enerji kaynakları (PV, TE, ısı değiştiricisi, güneş kolektörleri, ısı pompaları) sistemlerinde kullanımına ilişkin Skovajsa vd., [54] tarafından yapılan çalışmada termal konforu arttırdığı söylenmiştir. Jaworski vd., [55] FDM'nin TE modüllerde hem sıcak taraf hem de soğuk tarafında kullanılmasına yönelik deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu iki yüzeyde etkin bir şekilde kullanılabileceğini kanıtlamıştır. Hacim değişimlerine karşı en büyük duyarlılığın TE modüllerin soğuk taraf ile FDM'nin teması sayesinde iyileştirileceği bildirilmiştir.

PV-TE sistemlerde FDM kullanımı iki farklı şekilde uygulanmaktadır. Bunlardan biri Şekil 4a'da gösterilen PV ile TE modüllerin arasına entegre etmektir. Bu sayede PV modüllerin sıcaklığı bir miktar düştüğü gibi TE modüllerin sıcak tarafındaki sıcaklık dalgalanmalarını ortadan kaldırmaktadır. Bir diğeri ise TE modüllerin soğuk tarafının FDM'ler ile soğutulmasıdır. Şekil 4b'de PV-TE-FDM sistem kesiti verilmiştir. Burada ise TE modüller FDM tarafından pasif olarak soğutulur. Bu bölümde PV-TE sistemlerde FDM'lerin kullanımına ilişkin yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

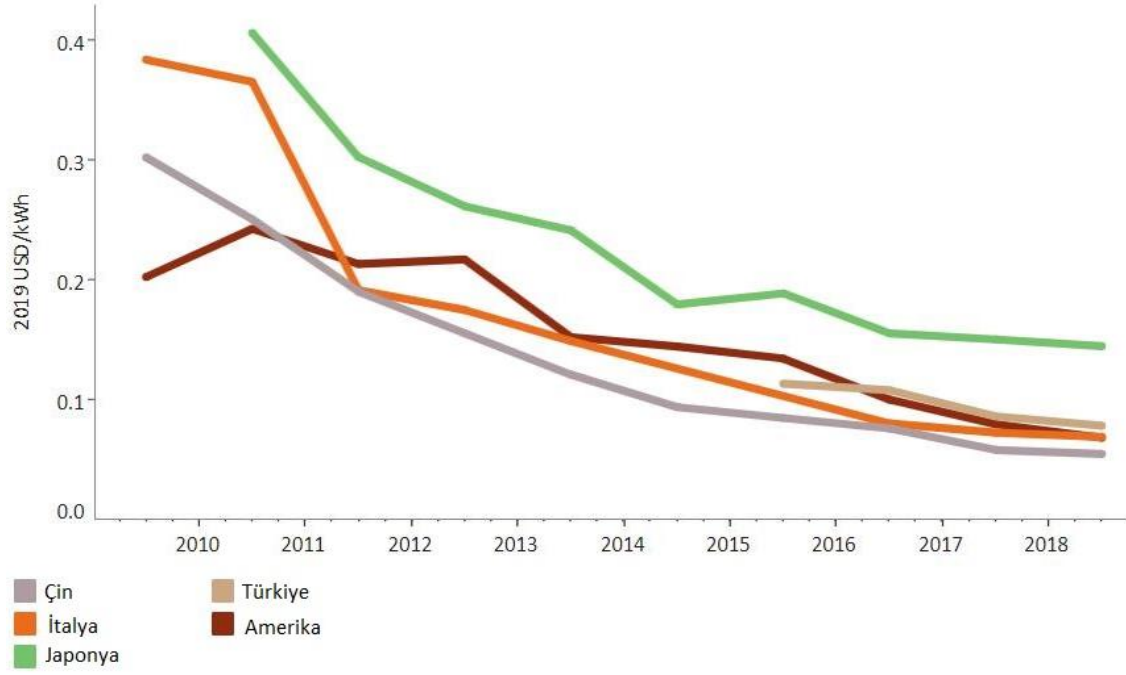


Şekil 4. (a) PV-FDM-TE güç üretim sistemi (b) PV-TE-FDM güç üretim sistemi

Cui vd., [56] yoğunlaştırılmış PV sistemin arkasına FDM modül ve FDM modülün arkasına TE modül yerleştirmiştir. Böylece PV-TE sistemlerdeki sıcaklık dalgalanmaları FDM modüller sayesinde azaltılmıştır. Yapılan teorik analize göre PV-PCM-TE sistemin klasik PV ve PV-TE sistemlerden daha üstün olduğu vurgulanmıştır. Diğer bir çalışmada [57] ise Fresnel lensli yoğunlaştırılmış tek eklemli GaAs PV hücre ile Bi₂Te₃ TE modül arasında FDM'nin entegrasyonu üzerine deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre önerilen sistemin güneş enerjisinin verimli kullanımını arttırdığını göstermiştir. Zhang ve Xuan [58] geleneksel PV-TE sistemde güneş ışınımı değişiminden kaynaklı sıcaklık dalgalanmalarını azaltmak için PV ile TE modüllerin arasında FDM kullanılmasını önermiştir. Deneysel ve nümerik sonuçlara göre; FDM erime sıcaklığının PV modül sıcaklığına yakın olduğunda önerilen sistem daha fazla güç üretmektedir. Yin vd., [59] PV-FDM-TE hibrit sistemin deneysel incelemesini gerçekleştirmiştir. Önerilen sistemde PV hücre sıcaklığı 50 °C'ye ulaşırken CPV-TE sistemde yaklaşık olarak 80 °C'ye ulaştığı görülmüştür. Ortalama olarak çıkış gücünün ise CPV-TE sisteme göre %23,52 artış sağladığı tespit edilmiştir. Motiei vd., [60] PV-TE sistemde termoelektrik modülün soğuk tarafına yerleştirilen FDM'nin soğutucu etkisini incelemek için geçici durum simülasyonu yapmıştır. Simülasyonda yapılan günlük analizlere göre; optimal değerde FDM kullanıldığında PV-TE sistem performansını önemli derecede iyileştirdiği görülmüştür. Bayrak vd., [61] kanatçıklı PV sistem ile birlikte 6, 8 ve 12 TE modüllü, kanatçıklı PV-TE sistem ve FDM soğutmalı PV ve hibrit PV-TE-PCM sistemin deneysel uygulamasını ve enerji, ekserji ve maliyet analizlerini yapmıştır. Deneysel sonuçlara göre kanatçıklı PV sistemin ürettiği güç 47,88 W'ı 12'li PV-TE sistemin gücü 45,87 W'tır. Enerji ve ekserji verimliliğinde ise yine kanatçıklı PV sistemin daha verimli olduğu gözlemlenmiştir. Naderi vd., [62] yansıtıcı PV-FDM-TE hibrit güç üretim sisteminin enerji performansını incelemiştir. Önerilen sistemde PV modül sıcaklığının 74,43 °C'den 53,72 °C'ye düşmesi sayesinde güç üretiminde %100 ve güneş hücre veriminde %1,38 artış görülmüştür. Ko ve Young [63] FDM'li binaya entegre PV-TE sistemin yıllık performansını değerlendirmiştir. Elde edilen bulgulara göre önerilen BIPV-TE sistem standart BIPV sisteme göre %1,09 (PV ve TE sırasıyla 0,91% ve 0,18%) daha fazla güç üretmektedir. Ayrıca ideal tasarım koşullarında önerilen sistemin referans sisteme göre %4,47 daha fazla enerji üretebileceği bildirilmiştir. PV, PV-TE ve PV-FDM-TE sistemlerin karşılaştırılması Zhang vd., [64] tarafından incelenmiştir. Önerilen PV-FDM-TE sistemde faz değiştiren malzemenin erime sıcaklığı göz önünde bulundurularak PV bant aralığının etkisi analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre optimum PV bant aralığı 1,15 eV iken verimliliğin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

D. PV-TE GÜÇ ÜRETİMİ İÇİN EKONOMİK DEĞERLENDİRMELER HAKKINDA YAPILAN ÇALIŞMALAR

Dünyada ve Türkiye'de yıllık olarak PV maliyetleri değişimi Şekil 5'te verilmiştir [65]. Şekilde görüldüğü gibi hem ülkemizde son yıllarda hem de dünyada kWh başına PV maliyetleri 0,1 USD'nin altına düşmüştür. Her geçen yıl PV maliyetlerinin düşüşü diğer enerji kaynaklarıyla daha rekabetçi olmaktadır. Bu sayede PV güç santrallerinin ve binalara entegresinin kurulumunun yaygınlaşması ile güneş enerjisinin enerji tüketimini karşılamadaki payı bir miktar artmakta ve CO₂ emisyonları azaltılabilmektedir. Bu bölümde daha önceki verilen çalışmalarda PV-TE sistemlerinin ekonomik analizlerine ait yapılan değerlendirmeler ve literatürde yapılan diğer çalışmalara yer verilmiştir.



Şekil 5. Ülkelere göre PV maliyetlerinin yıllık değişimi [65]

Deng vd., [7] soğurucu alan ve TE verimliliklerine göre güç üretim maliyeti analizini gerçekleştirmiştir. PV modül fiyatı 4 USD/Wp iken %5 verimli TE modülün 0,3 m² ve üstündeki soğurucu alanlar için önerilen sistemin ekonomik olarak daha düşük ve kabul edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır. Rezania vd., [14] üç farklı Avrupa ülkesi için PV-TE sistem performansı karşılaştırması yaptığı çalışmada sistem yatırım maliyetini de sunmuştur. PV modül maliyetinin kurulu güç (Wp) başına 0,72 USD olarak belirtilirken 40x40 mm'lik boyutlardaki TE jeneratörlerin maliyeti 5 USD olarak göz önünde bulundurulmuş ve sonuç olarak PV-TE sistemlerin ekonomik olarak çok pahalıya mal olacağı bildirilmiştir. Zhu vd., [17] termal yönetimli PV-TE sistemde PV modül alanı, soğurucu yüzey alanına göre ve farklı TE verimliliklerine göre enerji ve maliyet analiz çalışmasını yapmıştır. Önerilen PV-TE hibrit sistemin maliyetinin ısı soğurucu yüzeyin büyüklüğünün artırılarak azalacağı ve geleneksel PV sistemle daha rekabetçi olacağı söylenmiştir. Marandi vd., [20] tasarlanan oyuk tipi alıcılı PV-TE güç üretim sisteminin enerji-maliyet analizini sunmuştur. Önerilen sistemin geleneksel PV-TE sistemden %67 daha fazla olduğu ve maliyetinin 9,432 USD/kWh değerine ulaştığı bildirilmiştir. Willars-Rodríguez vd., [39] Fresnel yoğunlaştırılmalı CPV-TE sistemin ekonomik değerlendirmesini sunmuştur. CPV-TE sistemin birim maliyetinin 5,259 USD/W değerinde ve geleneksel PV sistemden 1,7 kat daha fazla olduğu belirtilmiştir. Rezania ve Rosendahl [67] CPV ve CPV-TE sistem için fizibilite ve parametrik analiz çalışması yapmıştır. ZT değeri 1 dolaylarında olan günümüzdeki TE malzemeli CPV-TE hibrit sistemin geleneksel CPV sistemden daha verimli olduğu, yoğunlaştırma oranının artmasıyla enerji maliyetinin azaldığı ve geleneksel sistemden bir miktar düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Montero vd., [68] düzlemsel PV-TE sistemin Şili iklim ve enerji marketini dikkate alarak ekonomik fizibilitesini gerçekleştirmiştir. Hibrit sistemde %20 verimlilikte PV modül göz önünde bulundurarak 25-100 °C PV modül sıcaklığındaki TE modül ve hibrit sistemin enerji performansları değerlendirilmiş ve ömür maliyet analizleri yapılmıştır. Elde edilen bulgulara göre Şili için TE modüllerin verimlilikleri ve var olan market fiyatlarından dolayı geleneksel PV sistemlerle ekonomik olarak rekabetçi olamadığı ve maliyetinin 0,071 USD/kWh olduğu bildirilmiştir. Narducci ve Lorenzi [69] PV-TE hibrit sistemlerin ekonomik elverişliliğine dair bir çalışma sunmuştur. Hibrit sistemin güneş enerjisinin dönüşümünü arttırmasına rağmen, güç maliyetlerin günümüzdeki teknolojide her zaman haklı çıkarmayacağı vurgulanmıştır. Bu çalışmalardan farklı olarak PV-TE sistemlerde ekonomik analizlerle birlikte termodinamik kanunları da göz önünde bulundurularak sistem değerlendirmeleri yapılabilmektedir. Ismaila vd., [70] genel performans indeksi kullanarak su soğutmalı CPV-TE sistemin termo-ekonomik analizini değerlendirmiştir. Sistem modelleme ve değerlendirme için bir boyutlu ısı transfer modeli kullanılmıştır. Ekonomik durum çalışması için maksimum genel performans indeksinin %94,7 olması

ile optimize edilmiş hibrit sistemin seviyelendirilmiş elektrik enerjisi maliyet değeri 0,0392 USD/kWh bulunmuştur. Performans durum çalışması için ise genel performans indeksinin değeri %93,8 iken seviyelendirilmiş elektrik enerjisi maliyet değeri 0,0396 USD/kWh olmuştur. Her iki durumda hibrit sistemin enerji verimliliği ise %40'ın üzerindedir. Ismaila vd., [71] çok eklemli güneş hücreli CPV-TEG güç üretim sisteminin eksergo-ekonomik optimizasyon çalışmasını gerçekleştirmiştir. Elde edilen bulgulara göre hibrit sistemin maksimum ekserji verimliliğinin %43,48 değerinde olduğu bildirilmiştir. Elektrik enerjisi birim maliyetinin ise tek bir CPV sistemde 0,57 USD/kWh iken CPV-TEG sistemde 0,53 USD/kWh olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

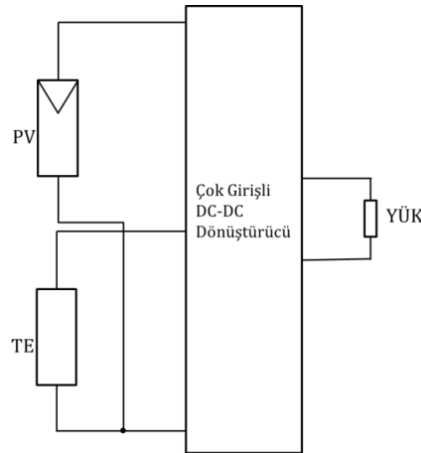
E. PV-TE GÜÇ DÜZENLEME VE GÖRÜNTÜLEME BİRİMLERİ HAKKINDA YAPILAN ÇALIŞMALAR

Güneş enerjisinden PV ile elektrik üretiminde güneş enerjisini etkin kullanmanın yolu PV modülleri maksimum güç noktasında çalıştırmaktır. Bunun için güç düzenleme birimleri ve kontrol algoritmaları kullanılır. Bu sistemler maksimum güç noktası izleme (MPPT) birimleri olarak adlandırılır. MPPT birimlerinde güç takibi yapmak için akım, gerilim sensörleri ve güç elektroniği devreleri kullanılır. Elektriksel gücün ölçümü ve mikrodenetleyicilerle kontrolü sayesinde güç değerleri görüntülenebilir ve kayıt edilebilir.

MPPT birimleri için güç elektroniği devrelerinde en çok tercih edilen teknolojilerden biri doğru akımda (DC) çalışan DC-DC dönüştürücülerdir. Bu dönüştürücüler ve MPPT algoritmaları sayesinde güneş enerjisinden üretilen güç verimli şekilde yüke aktarılır. Bu bölümde PV-TE güç üretimi sistemleri için geliştirilen güç düzenleme ve görüntüleme birimleri hakkında yapılan çalışmalar sunulmuştur. Ayrıca Şekil 6 ve Şekil 7'de verilen PV ve TE modül gibi çok enerji kaynaklı sistemler için tek giriş – tek çıkışlı ve çok giriş – tek çıkışlı güç devresi topolojilerine de yer verilmiştir. Çok girişli DC-DC dönüştürücülerin üstünlüğü daha az güç elemanı kullanılması ile maliyet ve kayıpların azaltılmasıdır. Bu sayede güneş enerjisinin daha verimli kullanılabilir.



Şekil 6. PV-TE sistem için tek giriş-tek çıkışlı dönüştürücü



Şekil 7. PV-TE sistem için çift giriş-tek çıkışlı dönüştürücü

Muhtaroglu vd, [72] mobil hesaplama cihazları için PV ve TE yardımcı güç kaynağı olarak entegrasyonunda iki düzeyli Dixon şarj pompalı yükseltici tip dönüştürücü geliştirmiştir. Fan vd., [73]

elektrikli hibrit araçlarda, PV modüller birlikte araçların egzoz ve radyatörlere entegre edilen TE modüllerden üretilen gücü bataryaya aktarımı için üç girişli-tek çıkışlı Çuk tipi DC dönüştürücü tasarlamıştır. Önerilen çok girişli dönüştürücü (MIC) teknolojisinin hibrit elektrikli araçlar için uygun olduğu ve her enerji kaynağının bağımsız olarak regüle edilebildiği vurgulanmıştır. Zhang ve Chau [74] PV ve TE güç üretim sistemlerinde güç düzenleme birimi için iki girişli SEPİC dönüştürücü tasarımı ve uygulaması gerçekleştirmiştir. Tasarlanan çok girişli dönüştürücü sisteminin maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritması ile test edilmiştir. Her iki modülden sağlanan çıkış gücünün kararlı ve optimal değere yakın çalıştığı gözlemlenmiştir. Diğer bir çalışmada ise Çuk tipi MIC dönüştürücü üzerindeki görev çevrim değerinin sabit olması ve MPPT kontrol ünitesi ile kontrolü durumundaki performansı karşılaştırılmıştır. Değişken PV ve TE çalışma koşullarında MPPT kontrolü sayesinde güç iyileştirmesinin yaklaşık %4 ile %16 arasında değiştiği gözlemlenmiştir [75]. Jung vd., [76] PV ve TE güç üretim sistemlerinden yüke ve bataryaya güç aktarımı için tek bobinli çift giriş ve çift çıkışlı yükseltici tip DC dönüştürücü tasarlamıştır. Önerilen ve tasarlanan DC dönüştürücüde zamanla çoğullanmış teknoloji kullanılmıştır. MPPT sayesinde güç aktarımının başarılı olduğu ve tasarlanan dönüştürücünün tepe veriminin %78 değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Liu vd., [77] çift girişli tek çıkışlı PV-TE güç düzenleme biriminde tek bobin kullanarak yüksek verimlilikte güç aktarımını başarmıştır. Tasarlanan küçük düzeydeki sistemde zamanla çoğullanmış teknoloji ve sıfır akım algılayıcı kullanılmıştır. PV ve TE modüllerden üretilen güçlerin yüke maksimum seviyede aktarılması için ise MPPT algoritması kullanılmıştır. TE ve PV modüllerin tepe izleme verimlilikleri %98'in üzerinde iken tepe dönüşüm verimliliği %85,7'dir. Bu durumun MPPT devresi ve sıfır akım algılayıcı düzenekten kaynaklandığı bildirilmiştir. Literatürdeki çalışmalarla karşılaştırıldığında önerilen topolojinin daha verimli olduğu görülmüştür. Kwan ve Wu [78] iki girişli-tek çıkışlı SEPIC dönüştürücü ile PV-TE sistemde güç dalgalanmalarını azaltmak için hedefe kilitleme mekanizmalı MPPT algoritması önermiştir. Önerilen algoritmanın kısa sürede MPP değerine ulaşmasında ve dalgalanmaların azaltılmasında etkin rol oynamıştır. Verma vd., [79] bataryalı PV-TE sistemin matematiksel modellemesini ve simülasyon çalışması ve MPPT algoritması ile sistem performansını incelemiştir. PV-TE sistemde ani güneş ışınımı değişimlerinde yük-batarya geçişlerinin etkin bir şekilde sağlanabildiği ve TE jeneratör sayesinde bataryada ekstra güç depolandığı bildirilmiştir. Sathyanathan vd., [80] PV ve TE jeneratörlü, bataryalı bir hibrit güç üretim sisteminde tek fazlı evirici ile düzeltilmiş adımli P&O algoritmasının tasarımı ve analizini sunmuştur. Önerilen evirici DC-DC dönüşümde alçaltıcı ve düşürücü mod ile test çalıştırılmıştır. 200 W'lık sistemde Li-ion bataryalar kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre önerilen eviricinin yaklaşık olarak %97 verimlilikte dönüşüm veriminin sağlandığı görülmüştür. Pereira vd., [81] PV-TE sistemde nesnelere interneti teknolojisini kullanarak güç görüntüleme sistemi tasarlamıştır. Elde edilen verilere göre aylık ortalama 15 °C sıcaklık farklılığında ticari bir TEG tarafından üretilen gerilimin 140 mV ile 220 mV arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Jena ve Kar [82] PV-TE sistemin rüzgar türbini ve yakıt hücresi ile entegrasyonunda aktif ve reaktif güç paylaşımlarını irdelemiştir. Sadece PV ve rüzgar enerjisi ile yapılan karşılaştırmaya göre PV-TE-rüzgar sisteminin daha az reaktif güç paylaştığı gözlemlenirken, PV-TE sisteme yakıt hücresi entegre edildiğinde reaktif gücün daha da düştüğü gözlemlenmiştir. Böylece TE jeneratörlerin entegrasyonunun çok verimli olduğu bildirilmiştir. Shen vd., [83] PV-TE sistemde verimli termal enerji yönetimi için kontrol ünitesinde güç izlemeli anahtar tekniği uygulamıştır. Önerilen teknik sayesinde tek bir PV modüle göre 84034 J daha fazla enerji depolandığı ve maksimum enerji verimliliğinin %15,65'lere kadar çıktığı gözlemlenmiştir. Mirza vd., [84] PV-TE sistemde homojen olmayan sıcaklık dağılımlarından dolayı oluşan çoklu tepe noktası durumlarında enerjinin verimli kullanımı için aritmetik optimizasyon algoritmasını kullanmıştır. Simülasyon ve deneysel çalışmalara göre 100 ms izleme süresi ve 280 ms yerleşme süresi ile %99,86 verimlilikte güç izleme gerçekleştirilmiştir. Önerilen algoritmanın diğer sezgisel algoritmalarından (parçacık sürüsü optimizasyon ve guguk kuşu arama algoritmaları) yaklaşık %66 daha verimli olduğu bildirilmiştir. Kanagaraj [85] PV ile DC dönüştürücüden sonra seri bağlı TE jeneratörlü hibrit sisteme bulanık mantık kontrollü oransal dereceli değişken artan iletkenlik tabanlı MPPT ile maksimum güç kontrolünü sağlamıştır. Yarı köprülü ve gerilim kaynaklı evirici ile alternatif akımda (AC) yük beslemek için kullanılmıştır. AC akımda güç kalitesinin iyileştirilmesi üzerine odaklanılan çalışmada sonuçlar göstermiştir ki önerilen sistemin kompanzasyon için güç kalitesi bozukluklarını derhal tanımladığını doğrulamıştır.

III. BULGULAR

Bu çalışmada PV-TE güç üretim sistemlerinde yapılan çalışmalar derlenmiştir. PV-TE sistemler beş grupta sınıflandırılmıştır. Bunlar geleneksel, yoğunlaştırılmalı, faz değiştiren malzeme entegreli, ekonomik değerlendirmeler ile güç düzenleme ve kaydetme birimleridir.

Geleneksel (düzlemsel) PV-TE sistemlerde ışınım değerinin belli seviyelerde olması PV modül sıcaklığını belli değerlere getirebilmektedir. Bu yüzden TE modüllerden üretilen güç modül arka sıcaklığı ile çevre sıcaklık değerlerinin farkı kadar sınırlandırılmaktadır. PV-TE güç üretim sistemleri geleneksel PV sistemlerden üstün olsa bile TE modüllerin verimlerinin düşük olmasından dolayı üretilen güç değeri de düşük kalmaktadır. Bunun için CPV-TE sistemler bir çözüm olmuştur.

CPV-TE sistemlerde güneş ışınımı ile yoğunlaştırma oranının artması modül sıcaklığını arttırmaktadır. PV modüllerde sıcaklık artışı güç düşüşüne sebep olurken; TE jeneratörlerde güç artışı sağlamaktadır. Bu yüzden iki modülden üretilen toplam güç değerini ise optimum değerde tutmak için optimum yoğunlaştırma oranını önem kazanmaktadır.

PV-TE sistemlerde faz değiştiren malzemelerin kullanımı son yıllarda popüler bir konu olmuştur. FDM'ler; PV ve TE modüllerin ve arkasına entegre edilerek iki farklı şekilde değerlendirilebilmektedir. PV modüllerin arkasına yerleştirildiğinde sıcaklık dalgalanmalarını azaltmakla birlikte PV modül sıcaklığını bir miktar düşürerek daha fazla güç üretimi sağlamaktadır. TE modüllerin soğuk tarafına yerleştirilmesi ise sıcak tarafı ile soğuk tarafı arasındaki sıcaklık farkını azaltmakta TE modüllerin güç üretimini arttırmaktadır. Faz değiştiren malzemelerin termofiziksel özellikleri ve erime noktalarının dikkate alınması güç üretim performansını iyileştirmek için önem kazanmaktadır.

PV-TE güç üretim sistemlerinin ekonomik tarafı açısından bakıldığında PV modüllerin maliyeti her geçen yıl azalmaktadır. Ancak TE modüllerin maliyetlerinin yüksek olması hibrit güç üretim sisteminin maliyetini arttırmakta ve dolayısıyla rekabetçi olmasını kısıtlamaktadır. Bunun için PV sistemler açısından incelendiğinde düşük sıcaklıklarda daha verimli ve daha ucuz TE modüllerin geliştirilmesi önem kazanmaktadır. Bu çalışmada sunulan literatür çalışmalarından da anlaşılacağı gibi PV-TE sistemlerde yeni tekniklerin de geliştirilmesi güç üretiminde artışla birlikte enerji maliyetini bir miktar düşürebilmektedir. Sonuç olarak yüksek TE modül fiyatları ve düşük verimlilik değerleri PV-TE sistemleri olumsuz etkilemektedir.

PV ve TE modüllerde üretilen elektriksel gücün yüke en verimli şekilde aktarımını güç düzenleme birimleri sağlar. DC-DC dönüştürücü ve maksimum güç noktası izleme algoritmasından oluşturulan bu birimlere ait yapılan çalışmalar incelendiğinde çok girişli ve tek çıkışlı DC-DC dönüştürücülerin daha uygun ve avantajlı olduğu görülmektedir. Güç eleman sayılarının azalması sayesinde maliyetlerin azaltılması ve güç kaybının da en az seviyelerde olması bir avantaj sağlamaktadır.

IV. SONUÇ

Bu çalışmada PV-TE güç üretim sistemlerinde yapılan seksen literatür çalışması derlenmiştir. PV-TE sistemler için derlenen çalışmalar beş grupta sınıflandırılmıştır. Bunlar geleneksel, yoğunlaştırılmalı, faz değiştiren malzeme entegreli, ekonomik değerlendirmeler ile güç düzenleme ve kaydetme birimleridir. Geleneksel PV-TE sistemlerdeki sıcaklık ve güç sınırlamalarını ortadan kaldırmak için yoğunlaştırılmış sistemlere geçiş olduğu görülmekle birlikte ve yeni teknikler geliştirilmeye çalışılmaktadır. PV-TE sistemlerin performansı geleneksel PV sistemlerden iyi olsa bile TE modül maliyetinin yüksek olması ve düşük verimliliği bu sistemler için bir engel oluşturmaktadır. Sonuç olarak incelendiğinde düşük sıcaklıklarda daha verimli ve daha ucuz TE modüllerin geliştirilmesi bu temel sorun için bir çözüm olacaktır.

TEŞEKKÜR: PV ve PV-TE sistemin deneysel çalışması için finansal destekte bulunan 19/090/04/1/1 numaralı Araştırma Projesi ile maddi destek sağlayan Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projesi birimine teşekkür ederim.

V. KAYNAKLAR

- [1] J.K. Tonui, Y. Tripanagnostopoulos, “Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements,” *Solar Energy*, vol. 81, pp. 498–511, 2007.
- [2] S. Armstrong, W.G. Hurley, “A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, pp. 1488-1495, 2010.
- [3] S. Kalogirou, Y. Tripanagnostopoulos, Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production, *Energy Conversion and Management*, vol. 47, pp. 3368–3382, 2007.
- [4] W. Glatz, E. Schwyter, L. Durrer, C. Hierold, “Bi₂Te₃-Based Flexible Micro Thermoelectric Generator With Optimized Design,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 18, pp. 763-772, 2009.
- [5] V.G.J.H.M. van Sark, “Feasibility of photovoltaic - thermoelectric hybrid modules,” *Applied Energy*, vol. 88, pp. 2785-2790, 2011.
- [6] D. Yang, H. Yin, “Energy Conversion Efficiency of a Novel Hybrid Solar System for Photovoltaic, Thermoelectric, and Heat Utilization,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, pp. 662-670, 2011.
- [7] Y. Deng, W. Yu, Y. Wang, Y. Shi, “Enhanced performance of solar-driven photovoltaic–thermoelectric hybrid system in an integrated design,” *Solar Energy*, vol. 88, pp. 182–191, 2013.
- [8] W. Lin, T.M. Shih, J.C. Zheng, Y. Zhang, J. Chen, “Coupling of temperatures and power outputs in hybrid photovoltaic and thermoelectric modules,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 74, pp. 121-127, 2014.
- [9] S. Dong, T.M. Shih, W. Lin, X. Cai, R.R.G. Chang, Chen Z., “Time-Dependent Photovoltaic-Thermoelectric Hybrid Systems,” *Numerical Heat Transfer, Part A-Applications*, vol. 66, pp. 402-419, 2014.
- [10] R. Bjørk, K.K. Nielsen, “The performance of a combined solar photovoltaic (PV) and thermoelectric generator (TEG) system,” *Solar Energy*, vol. 120, pp. 187-194, 2015.
- [11] B. Lorenzi, M. Acciarri, D. Narducci, “Analysis of Thermal Losses for a Variety of Single-Junction Photovoltaic Cells: An Interesting Means of Thermoelectric Heat Recovery,” *Journal of Electronic Materials*, vol. 44, pp. 1809–1813, 2015.
- [12] D.N. Kossyvakis, G.D. Voutsinas, E.V. Hristoforou, “Experimental analysis and performance evaluation of a tandem photovoltaic–thermoelectric hybrid system,” *Energy Conversion and Management*, vol. 117, pp. 490–500, 2016.
- [13] F. Attivissimo, A. Di Nisio, A.M.L. Lanzolla, M. Paul, “Feasibility of a Photovoltaic–Thermoelectric Generator: Performance Analysis and Simulation Results,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 64, pp. 1158-1169, 2015.
- [14] A. Rezanian, D. Sera, L.A. Rosendahl, “Coupled thermal model of photovoltaic-thermoelectric

hybrid panel for sample cities in Europe,” *Renewable Energy*, vol. 99, pp. 127-135, 2016.

[15] A. Hashim, J.J. Bompfrey, G. Min, “Model for geometry optimisation of thermoelectric devices in a hybrid PV/TE system,” *Renewable Energy*, vol. 87, pp. 458-463, 2016.

[16] T.H. Kwan, X. Wu, “Power and mass optimization of the hybrid solar panel and thermoelectric generators,” *Applied Energy*, vol. 165, pp. 297-307, 2016.

[17] W. Zhu, Y. Deng, Y. Wang, S. Shen, R. Gulfam, “High-performance photovoltaic-thermoelectric hybrid power generation system with optimized thermal management,” *Energy*, vol. 100, pp. 91-101, 2016.

[18] D.T. Cofas, P.A. Cofas, D. Ciobanu, O.M. Machidon, “Characterization of Photovoltaic–Thermoelectric–Solar Collector Hybrid Systems in Natural Sunlight Conditions,” *Journal of Energy Engineering*, vol. 143 no. 04017055, 2017.

[19] S., Soltani A., Kasaeian H., Sarrafha D. Wen, “An experimental investigation of a hybrid photovoltaic/thermoelectric system with nanofluid application,” *Solar Energy*, vol. 155, pp. 1033-1043, 2017.

[20] O.F. Marandi, M. Ameri, B. Adelshahian, “The experimental investigation of a hybrid photovoltaic-thermoelectric power generator solar cavity-receiver,” *Solar Energy*, vol. 161, pp. 38–46, 2018.

[21] G. Li, S. Shittu, K. Zhou, X. Zhao, X. Ma, “Preliminary experiment on a novel photovoltaic-thermoelectric system in summer,” *Energy*, vol. 188, no. 116041, 2019.

[22] S. Shittu, G. Li, X. Zhao, J. Zhou, X. Ma, Y.G. Akhlaghi, “Experimental study and exergy analysis of photovoltaic-thermoelectric with flat plate micro-channel heat pipe,” *Energy Conversion and Management*, vol. 207, no. 112515, 2020.

[23] P. Huen, W.A. Daoud, “Advances in hybrid solar photovoltaic and thermoelectric generators,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, pp. 1295–1302, 2017.

[24] Y.J. Cui, B.L. Wang, J.E. Li, K.F. Wang, “Performance evaluation and lifetime prediction of a segmented photovoltaic-thermoelectric hybrid system,” *Energy Conversion and Management*, vol. 211, no. 112744, 2020.

[25] A.E. Siemenn, E.E. Loney, T. Buonassisi, Z. Liu, “Does Energy Yield Increase when Conjoining a PV Module with a Thermoelectric Device?,” *47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 15 June - 21 Aug. 2020, Calgary, AB, Canada, pp. 295-300.

[26] B. Zhao, M. Hu, X. Ao, Q. Xuan, Z. Song, G. Pei, “Is it possible for a photovoltaic-thermoelectric device to generate electricity at night?,” *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 228, pp. 111136, 2021.

[27] M.A.I. Khan, M.I. Khan, A.H. Kazim, A. Shabir, F. Riaz, N. Mustafa, H. Javed, A. Raza, M. Hussain, C.A. Salman, “An Experimental and Comparative Performance Evaluation of a Hybrid Photovoltaic-Thermoelectric System,” *Frontiers in Energy Research*, vol. 9, no. 722514, 2021.

[28] G. Kidegho, F. Njoka, C. Muriithi, R. Kinyua, “Evaluation of thermal interface materials in mediating PV cell temperature mismatch in PV–TEG power generation,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 1636–1650, 2021.

[29] A. Ruzaimi, S. Shafie, W.Z.W. Hassan, N. Azis, M. Effendy Ya’acob, E. Elianddy, W. Aimrun,

“Performance analysis of thermoelectric generator implemented on non-uniform heat distribution of photovoltaic module,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 2379–2387, 2021.

[30] C. Demircan, “Fotovoltaik – Termoelektrik (PV-TE) Hibrit Güç Üretim Sistemlerinin Performanslarının İncelenmesi,” Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye, 2022.

[31] Y. Vorobiev, J. González-Hernández, P. Vorobiev, L. Bulat, “Thermal-photovoltaic solar hybrid system for efficient solar energy conversion,” *Solar Energy*, vol. 80, pp. 170–176, 2006.

[32] T. Liao, B. Lin, Z. Yang, “Performance characteristics of a low concentrated photovoltaic–thermoelectric hybrid power generation device,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 77, pp. 158-164, 2014.

[33] O. Beeri, O. Rotem, E. Hazan, E.A. Katz, A. Braun, Y. Gelbstein, “Hybrid photovoltaic-thermoelectric system for concentrated solar energy conversion: Experimental realization and modeling,” *Journal of Applied Physics*, vol. 118, pp. 115104, 2015.

[34] R. Lamba, S.C. Kaushik, “Modeling and performance analysis of a concentrated photovoltaic–thermoelectric hybrid power generation system,” *Energy Conversion and Management*, vol. 115, pp. 288-298, 2016.

[35] J. Zhang, Y. Xuan, “Investigation on the effect of thermal resistances on a highly concentrated photovoltaic-thermoelectric hybrid system,” *Energy Conversion and Management*, vol. 129, pp. 1–10, 2016.

[36] E. Yin, Q. Li, Y. Xuan, “Thermal resistance analysis and optimization of photovoltaic-thermoelectric hybrid system,” *Energy Conversion and Management*, vol. 143, pp. 188-202, 2016.

[37] J. Zhang, Y. Xuan, L. Yang, “A novel choice for the photovoltaic–thermoelectric hybrid system: the perovskite solar cell,” *International Journal of Energy Research*, vol. 40, pp. 1400-1409, 2016.

[38] G. Contento, B. Lorenzi, A. Rizzo, D. Narducci, “Efficiency enhancement of a-Si and CZTS solar cells using different thermoelectric hybridization strategies,” *Energy*, vol. 131, pp. 230-238, 2017.

[39] F.J. Willars-Rodríguez, E.A.Chávez-Urbiola, P. Vorobiev, Y.V. Vorobiev, “Investigation of solar hybrid system with concentrating Fresnel lens, photovoltaic and thermoelectric generators,” *International Journal of Energy Research*, vol. 41, pp. 377-388, 2017.

[40] D. Li, Y. Xuan, Q. Li, H. Hong, “Exergy and energy analysis of photovoltaic-thermoelectric hybrid systems,” *Energy*, vol. 126, pp. 343-351, 2017.

[41] G. Li, X. Chen, Y. Jin, “Analysis of the Primary Constraint Conditions of an Efficient Photovoltaic-Thermoelectric Hybrid System,” *Energies*, vol. 10, no. 20, 2017.

[42] Y.-P. Zhou, Y.-L. He, Y. Qiu, Q. Ren, T. Xie, “Multi-scale investigation on the absorbed irradiance distribution of the nanostructured front surface of the concentrated PV-TE device by a MC-FDTD coupled method,” *Applied Energy*, vol. 207, pp. 18-26, 2017.

[43] T.H. Kil, S. Kim, D.H. Jeong, D.M. Geum, S. Lee, S.J. Jung, S. Kim, C. Park, J.S. Kim, J.M. Baik, K.S. Lee, C.Z. Kim, W.J. Choi, S.H. Baek, “A highly-efficient, concentrating-photovoltaic/thermoelectric hybrid generator, *Nano Energy*,” vol. 37, pp. 242–247, 2017.

[44] S. Soltani, A. Kasaeian, T. Sokhansefat, M.B. Shafii, “Performance investigation of a hybrid photovoltaic/thermoelectric system integrated with parabolic trough collector,” *Energy Conversion and*

Management, vol. 159, pp. 371-380, 2018.

[45] M. Hajji, H. Labrim, M. Benaissa, A. Laazizi, H. Ez-Zahraouy, E. Ntsoenzok, J. Meot, A. Benyoussef, "Photovoltaic and thermoelectric indirect coupling for maximum solar energy exploitation," *Energy Conversion and Management*, vol. 136, pp. 184-191, 2017.

[46] S. Mahmoudinezhad, A. Rezania, L.A. Rosendahl, "Behavior of hybrid concentrated photovoltaic-thermoelectric generator under variable solar radiation," *Energy Conversion and Management*, vol. 164, pp. 443-452, 2018.

[47] E. De-la-Vega, A. Torres-Hernandez, P.M. Rodrigo, F. Brambila-Paz, "Fractional derivative-based performance analysis of hybrid thermoelectric generator-concentrator photovoltaic system," *Applied Thermal Engineering*, vol. 193, no. 116984, 2021.

[48] E. Yin, Q. Li, Y. Xuan, "One-day performance evaluation of photovoltaic-thermoelectric hybrid system," *Energy*, vol. 143, pp. 337-346, 2018.

[49] E. Yin, Q. Li, Y. Xuan, "Optimal design method for concentrating photovoltaic-thermoelectric hybrid system," *Applied Energy*, vol. 226, pp. 320-329, 2018.

[50] E. Yin, Q. Li, Y. Xuan, "Experimental optimization of operating conditions for concentrating photovoltaic-thermoelectric hybrid system," *Journal of Power Sources*, vol. 422, pp. 25-32, 2019.

[51] P.M. Rodrigo, Á. Valera, E.F. Fernández, F.M. Almonacid, "Annual Energy Harvesting of Passively Cooled Hybrid Thermoelectric Generator-Concentrator Photovoltaic Modules," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 9, pp. 1652-1660, 2019.

[52] A. Yusuf, N. Bayhan, H. Tiryaki, H. Hamawandi, M.S Toprak, S. Ballikaya, "Multi-objective optimization of concentrated Photovoltaic-Thermoelectric hybrid system via non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA II)," *Energy Conversion and Management*, vol. 236, no. 114065, 2021.

[53] U.A. Saleh, M.A. Johar, S.A. Jumaat, M.N. Rejab, W.A. Wan Jamaludin, "Evaluation of a PV-TEG Hybrid System Configuration for an Improved Energy Output: A Review," *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 10, pp. 385-400, 2021.

[54] J. Skovajsa, M. Koláček, M. Zálešák, "Phase Change Material Based Accumulation Panels in Combination with Renewable Energy Sources and Thermoelectric Cooling," *Energies*, vol. 10, no. 152, 2017.

[55] M. Jaworski, M. Bednarczyk, M. Czachor, "Experimental investigation of thermoelectric generator (TEG) with PCM module," *Applied Thermal Engineering*, vol. 96, pp. 527-533, 2016.

[56] T. Cui, Y. Xuan, Q. Li, "Design of a novel concentrating photovoltaic-thermoelectric system incorporated with phase change materials," *Energy Conversion and Management*, vol. 112, pp. 49-60, 2016.

[57] T. Cui, Y. Xuan, E. Yin, Q. Li, D. Li, "Experimental investigation on potential of a concentrated photovoltaic-thermoelectric system with phase change materials," *Energy*, vol. 122, pp. 94-102, 2017.

[58] J. Zhang, Y. Xuan, "Performance improvement of a photovoltaic - Thermoelectric hybrid system subjected to fluctuant solar radiation," *Renewable Energy*, vol. 113, pp. 1551-1558, 2017.

[59] E. Yin, Q. Li, D. Li, Y. Xuan, "Experimental investigation on effects of thermal resistances on a photovoltaic-thermoelectric system integrated with phase change materials," *Energy*, vol. 169, pp. 172-185, 2019.

- [60] P. Motiei, M. Yaghoubi, E. GoshtasbiRad, "Transient simulation of a hybrid photovoltaic-thermoelectric system using a phase change material," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 39, pp. 200-213, 2019.
- [61] F. Bayrak, H.F. Oztop, F. Selimefendigil, "Experimental study for the application of different cooling techniques in photovoltaic (PV) panels," *Energy Conversion and Management*, vol. 212, pp. 112789, 2020.
- [62] M. Naderi, B.M. Ziapour, M.Y. Gendeshmin, "Improvement of photocells by the integration of phase change materials and thermoelectric generators (PV-PCM-TEG) and study on the ability to generate electricity around the clock," *Journal of Energy Storage*, vol. 36, pp. 102384, 2021.
- [63] J. Ko, J.W. Jeong, "Annual performance evaluation of thermoelectric generator-assisted building-integrated photovoltaic system with phase change material," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 145, pp. 111085, 2021.
- [64] J. Zhang, J. Zhang, Y. Qian, J. Dong, "The influence of the bandgap on the photovoltaic-thermoelectric hybrid system," *International Journal of Energy Research*, vol. 45, pp. 3979–3987, 2021.
- [65] IRENA Solar Costs, <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Costs/Solar-Costs> (Erişim Tarihi: 03.12.2021).
- [66] G. Li, X. Zhao, J. Ji, "Conceptual development of a novel photovoltaic-thermoelectric system and preliminary economic analysis," *Energy Conversion and Management*, vol. 126, pp. 935–943, 2016.
- [67] A. Rezania, L.A. Rosendahl, "Feasibility and parametric evaluation of hybrid concentrated photovoltaic-thermoelectric system," *Applied Energy*, vol. 187, pp. 380–389, 2017.
- [68] F.J. Montero, R. Kumar, R. Lamba, R.A. Escobar, M. Vashishtha, S. Upadhyaya, A.M. Guzman, "Hybrid photovoltaic-thermoelectric system: Economic feasibility analysis in the Atacama Desert, Chile," *Energy*, vol. 239, no. 122058, 2022.
- [69] D. Narducci, B. Lorenzi, "Economic Convenience of Hybrid Thermoelectric-Photovoltaic Solar Harvesters," *ACS Applied Energy Materials*, vol. 4, pp. 4029–4037, 2021.
- [70] K.G. Ismaila, A.Z. Sahin, B.S. Yilbas, A. Al-Sharafi, "Thermo-economic optimization of a hybrid photovoltaic and thermoelectric power generator using overall performance index," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 144, pp. 1815-1829, 2021.
- [71] K.G. Ismaila, A.Z. Sahin, B.S. Yilbas, "Exergo-economic optimization of concentrated solar photovoltaic and thermoelectric hybrid generator," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 145, pp. 1035–1052, 2021.
- [72] A. Muhtaroglu, A. Yokochi, A. von Jouanne, "Integration of thermoelectrics and photovoltaics as auxiliary power sources in mobile computing applications," *Journal of Power Sources*, vol. 177, pp. 239-246, 2008.
- [73] Y. Fan, L. Ge, W. Hua, "Multiple-input DC-DC converter for the thermoelectric-photovoltaic energy system in Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1-3 Sept., Lille, France, no. 11873614, 2010.
- [74] X. Zhang, K.T. Chau, "Design and Implementation of a New Thermoelectric-Photovoltaic Hybrid Energy System for Hybrid Electric Vehicles," *Electric Power Component and Systems*, vol. 139, pp. 511-525, 2011.

- [75] X. Zhang, K.T. Chau, "An automotive thermoelectric–photovoltaic hybrid energy system using maximum power point tracking," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, pp. 641–647, 2011.
- [76] D.H. Jung, K. Kim, S.O. Jung, "Thermal and solar energy harvesting boost converter with time-multiplexing MPPT algorithm," *IEICE Electronic Express*, vol. 13, no. 12, pp. 1-9, 2016.
- [77] L. Liu, P. Zhang, X. Liao, Z. Zhu, "A single-inductor thermoelectric and photovoltaic hybrid harvesting interface with time-multiplexed technology and accurate zero current detector," *Microelectronics Journal*, vol. 113, no. 105062, 2021.
- [78] T.H. Kwan, X. Wu, "The Lock-On Mechanism MPPT algorithm as applied to the hybrid photovoltaic cell and thermoelectric generator system," *Applied Energy*, vol. 204, pp. 873-886, 2017.
- [79] V. Verma, A. Kane, B. Singh, "Complementary performance enhancement of PV energy system through thermoelectric generation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 1017–1026, 2016.
- [80] M. Sathiyathan, S. Jaganathan, R.L. Josephine, "Design and Analysis of Universal Power Converter for Hybrid Solar and Thermoelectric Generators," *Journal of Power Electronics*, vol. 19, pp. 220-233, 2019.
- [81] R.I.S. Pereira, M.M. Camboim, A.W.R. Villarim, C.P. Souza, S.C.S. Jucá, P.C.M. Carvalho, "On harvesting residual thermal energy from photovoltaic module back surface," *International Journal of Electronics and Communications*, vol. 111, no. 152878, 2019.
- [82] S. Jena, S.K. Kar, "Employment of solar photovoltaic-thermoelectric generator-based hybrid system for efficient operation of hybrid nonconventional distribution generator," *International Journal of Energy Research*, vol. 44, pp. 109-127, 2020.
- [83] Z.H. Shen, H. Ni, C. Ding, G.R. Sui, H.Z. Jia, X.M. Gao, N. Wang, "Improving the Energy-Conversion Efficiency of a PV–TE System With an Intelligent Power-Track Switching Technique and Efficient Thermal-Management Scheme," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 11, pp. 963-973, 2021.
- [84] A.F. Mirza, M. Mansoor, K. Zerbakht, M.Y. Javed, M.H. Zafar, N.M. Khan, "High-efficiency hybrid PV-TEG system with intelligent control to harvest maximum energy under various non-static operating conditions," *Journal of Cleaner Production*, vol. 320, no. 128643, 2021.
- [85] N. Kanagaraj, "Hybrid Renewable Energy Source Combined Dynamic Voltage Restorer for Power Quality Improvement," *Computer Systems Science and Engineering*, vol. 40, pp. 517–538, 2022.