



Bu bir MMO
yayıdır

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

ENDÜSTRİYEL SİSTEMLERDE YÜKSEK SICAKLIKLI ATIK ISI KAZANIM AMAÇLI TERMOFOTOVOLTAİK UYGULAMALARINDA TEORİK MODELLEME

BÜŞRA SELENAY ÖNAL
ZAFER UTLU
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ

ENDÜSTRİYEL SİSTEMLERDE YÜKSEK SICAKLIKLI ATIK ISI KAZANIM AMAÇLI TERMOFOTOVOLTAİK UYGULAMALARINDA TEORİK MODELLEME

Theoretical Modelleme in Thermophotovoltaic Applications For Waste Heat With High Temperature in Industrial Systems

Büşra Selenay ÖNAL
Zafer UTLU

ÖZET

Bu çalışmada enerji kayıplarının minimize edilmesine katkıda bulunacak yöntemlerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Literatürden, endüstriyel uygulamalarda atık ısılarından faydalanma yöntemleri araştırılmış ve yüksek sıcaklıklardaki ısı kaynaklarından atmosfere salınan atık ısı enerjisini termofotovoltaik enerji dönüşüm sistemleri ile elektrik enerjisine dönüştüren teorik bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde, demir-çelik endüstrisindeki yüksek sıcaklıklı atık ısılarından ısıyım yolu ile elektrik üretim amaçlı termofotovoltaik dönüşüm sistemi incelenmiştir. Termofotovoltaik enerji dönüşüm sistemi, ısı kaynağı, seçici yayıcı, filtre ve bir fotovoltaik hücre modülünden oluşmaktadır. Düzenekte bulunan ısı kaynağının, enerjiyi fotovoltaik hücre modülüne yayan seçici yayıcıya termal enerji sağlaması, fotovoltaik hücre modülünün de termal enerjiyi elektrik enerjisine çevirmesiyle kayıp enerji geri kazanılmıştır.

Yapılan çalışmada, termofotovoltaik sistemlerde, hücre tipi, radyatör sıcaklığı, hücre sıcaklığı, seri ve paralel direnç parametrelerinin hücre verimliliğine etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde termofotovoltaik enerji dönüşüm sistemlerinin uygulanabilirliği, verimliliği ve geliştirilmesine yönelik görüşler belirtilmiş ve öneriler sunulmuştur. Bu çalışmanın daha sonra yapılacak çalışmalara bir kaynak oluşturması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Termofotovoltaik, atık ısı, enerji kazancı, ısı kazanımı, fotovoltaik hücre, elektrik üretimi

ABSTRACT

In this study, it is aimed to develop methods to contribute to minimizing energy losses. In the literature, the methods of exploiting waste heat in industrial applications have been investigated and a theoretical model has been developed that converts waste heat energy released from high temperature heat sources into electricity by thermophotovoltaic energy conversion systems. In the created model, the thermophotovoltaic conversion system for the production of electricity by radiation from waste heat of high temperature in iron and steel industry has been examined. The thermophotovoltaic energy conversion system consists of a heat source, a selective emitter, a filter and a photovoltaic cell module.

The heat source in the apparatus provides thermal energy for the selective emitter. The photovoltaic cell module also converts the thermal energy into electrical energy, so that the lost energy is restored to the system.

In the study, the effects of cell type, radiator temperature, cell temperature, serial and parallel resistance parameters on cell efficiency were investigated in thermophotovoltaic systems. As a result of the obtained results, opinions about the feasibility, efficiency and development of

thermophotovoltaic energy conversion systems are stated and suggestions are presented. This study is intended to be a resource for further study.

Keywords: Thermophotovoltaic, waste heat, energy gain, heat recovery, photovoltaic cell, electricity generation

1.GİRİŞ

Enerji tüketiminin giderek artması, fosil enerji kaynaklarının ömrünün kısılması ve bu kaynakların çevreye vermiş olduğu zararlar, dünyada yeni enerji kaynakları arayışına ve kullanılan enerji kaynaklarından maksimum verim elde etme yönündeki araştırmalara hız kazandırmıştır [1].

Endüstriyel sistemlerde üretim aşamasında atık ısı meydana gelmektedir. Atık ısı, sistemde yapılan iş sonucu oluşan düşük enerjili ısıdır. Makineler, fırınlar ve soba gibi sistemler çalıştıkları süre boyunca ısı yayarlar [2]. Üretim aşamasında atık ısı; üründen, ısıtıcıdan(fırın duvarı, soba vb.) ve baca gazından çıkabilmektedir.

Atık ısı kazanım yolları farklı endüstrilere göre değişebilmektedir. Atık ısı kazanım yolları arasında eşanjörler, reküperatörler, ısı kazanları, pasif hava ısıtıcılar, rejeneratif ve ekonomizerler sayılabilir. Isı eşanjörleri genellikle egzoz gazları ısını fırına giren yanma havasına transfer etmek için kullanılır. Reküperatörler baca gazındaki atık ısının yakma havasına aktarıldığı ısı değiştiricilerdir. Atık ısı kazanları, sıcak gazın önüne yerleştirilerek atık sıcak gazın enerjisinden yararlanılıp suyun ısıtılması sağlanmaktadır. Pasif hava ısıtıcılar, düşük ve orta sıcaklık uygulamaları için gazdan gaza ısı kazanımı yapan cihazlardır. Ekonomizerler düşük ve orta sıcaklıktaki sıvıları ısıtmak için kullanılan egzoz gazlarından ısıyı geri kazanmak için kullanılırlar [1]. Bu sisteme ilave olarak elektrik üretme amaçlı termoelektrik ve termofotovoltaik (TPV) sistemlerin kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Termoelektrik sistemler ısının doğrudan elektriğe çevrilmesi yöntemi ile çalışırken, termofotovoltaik sistemler ışıyım ile elektrik üretimini hedeflemektedir.

TPV' nin keşfi yaklaşık 1956 yılına dayanmaktadır. Çoğu literatür referansı, 1956'da MIT 'de yapılan bir dizi konferans sırasında kavramı öneren TPV' nin mucidi olarak Aigrain 'i belirtmektedir. [3, 4]. Nelson, Kolm tarafından TPV sistemi ve " Güneş pilleri güç kaynağı " başlıklı bir yayın hakkında bilgi verilmiştir [5, 6]. 1970'lerin ortalarına kadar ABD'de yapılan araştırmalar, ısı kaynağı olarak fosil yakıtı kullanan düşük gürültülü bağımsız askeri elektrik jeneratörlerine odaklanmıştır. Bu dönemde üç temel ısı kaynağı (güneş, nükleer ve yanma) ve spektral kontrol seçenekleri (seçici radyatör, filtre, PV hücresi ön ve arka yüzey reflektörü) tanımlanmıştır [5, 7-9]. TPV dönüşümünü kullanarak endüstriyel atık ısı geri kazanımı, 1990'ların sonunda Coutts tarafından önerilmiştir [10]. Ayrıca, 1990'lı yılların sonunda Yakın Alan TPV (NF-TPV) alanındaki temel araştırmalar başlamıştır. 2000'li yılların başından itibaren elektrik gücü 10 W'ın altındaki minyatür TPV jeneratörlerinin gelişimi hızlanmıştır.

Yapılan bu çalışmalar TPV uygulamalarının giderek arttığını, enerji dönüşümü ve verimliliği açısından büyük katkı sağladığını göstermektedir. TPV uygulamalarının konut, otomotiv, endüstri vb. sektörlere girdiği ve elektrik üretimine alternatif getirdiği görülmektedir.

2.ATIK ISILARIN SINIFLANDIRILMASI

Endüstride atık ısılar; düşük sıcaklıktaki ısı kaynaklarından elde edilen atık ısılar, orta sıcaklıktaki ısı kaynaklarından elde edilen atık ısılar ve yüksek sıcaklıktaki ısı kaynaklarından elde edilen atık ısılar olmak üzere üç gruba ayrılabilir. Düşük sıcaklık atık ısıları düşük buhar basıncı ihtiyacı ve ön ısıtma amacı için tamamlayıcı bir yol olarak yararlı olabilir [2].

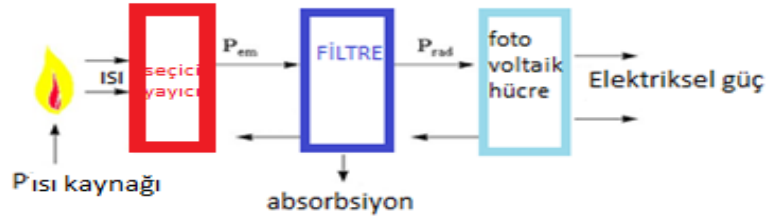
Endüstriyel proses ekipmanlarının orta sıcaklık aralıklarındaki atık gaz sıcaklık değerleri Tablo 1’de gösterilmiştir. Bu orta sıcaklıktaki değerlerin çoğu yanma süreçlerinden elde edilmiştir [2]. Endüstriyel proses ekipmanlarının yüksek sıcaklık aralıklarındaki atık gaz sıcaklık değerleri de Tablo 1’de gösterilmiştir. Bütün bu sonuçlar direkt olarak yanma süreçlerinden elde edilmiştir [2].

Tablo 1.Düşük, Orta ve Yüksek Sıcaklıkta Farklı Kaynaklardan Elde Edilen Atık Isı Değerleri [2].

Düşük Sıcaklık		Orta Sıcaklık		Yüksek Sıcaklık	
Isı Kaynağı	Sıcaklık(°C)	Isı Kaynağı	Sıcaklık(°C)	Isı Kaynağı	Sıcaklık(°C)
Buhar Yoğuşurma Prosesleri	55-88	Buhar Kazanı Egzozları	230-480	Nikel Rafine Fırınları	1370-1650
Soğutma Suyu	-	Gaz Türbini Egzozları	370-540	Alüminyum Rafine Fırınları	650-760
Kaynak Makineleri	32-88	Pistonlu Motor Egzozları	315-600	Çinko Rafine Fırınları	760-1100
Enjeksiyon Makineleri	32-88	Pistonlu Motor Egzozları(Turbo Şarjlı)	230-370	Bakır Rafine Fırınları	760-815
Tavlama Fırınları	66-230	Isıl İşlem Fırınları	425-650	Çelik Isıtma Fırınları	925-1050
İçten Yanmalı Motorlar	66-120	Kurutma ve Pişirme Fırınları	230-600	Bakır Reverber Fırını	900-1100
Kalıp Şekillendirme	27-88	Katalitik Krakerler	425-650	Açık Ocak Fırınları	650-700
Klima ve Soğutma Kondansatörleri	32-43	Tavlama Fırını Soğutma Sistemleri	425-650	Çimento Fırınları(Kurutma Süreci)	620-730
Kurutma, Pişirme ve Külleme Fırınları	93-232	-	-	Cam Eritme Fırınları	1000-1550
-	-	-	--	Hidrojen Tesisleri	650-1000
-	-	-	-	Katı Atık Yakma Tesisleri	650-1000
-	-	-	-	Çöp Yakma Fırını	650-1450

3.TERMOFOTOVOLTAİK SİSTEMLER

Termofotovoltaik sistemler, yüksek sıcaklıklı atık ısılardan ve güneş radyasyonundan ısı enerjisi ve elektrik enerjisi üreten sistemlerdir. Fotovoltaik hücre üzerine gelen güneş ışınları hücre tarafından absorbe edilerek ısı enerjisini elektrik enerjisine çevirirler. Termofotovoltaik sistem; seçici yayıcı, ısı kaynağı, filtre ve bir fotovoltaik hücreden oluşmaktadır. Sistemdeki ısı kaynağı, ısı enerjisini seçici yayıcıya iletir, fotovoltaik hücre modülü de termal enerjiyi elektrik enerjisine çevirir. Bu dönüşüm mevcut elektrik üretimine alternatif olarak düşünülmektedir. Aynı zamanda elde edilecek elektrik enerjisi, endüstriyel sistemlerde üretim aşamasında meydana gelen atık ısıdan elde edilmektedir. Bu durum enerjiden ve maliyetten tasarruf sağlamaktadır. Ayrıca çevreye salınan atık ısı değerlendirilmektedir.



Şekil 1. TPV sisteminin şeması ve geliştirilen bir TPV prototipi

Bu enerji sisteminin ana avantajları;

- 1.Yüksek yakıt kullanım faktöründe (termal kayıpların çoğunun geri kazanımı sayesinde birliğe yakın, TPV sistemini kombine bir ısı ve güç olarak kullanmayı mümkün kılmaktadır)
2. Düşük üretilen gürültü seviyeleri (hareketli parçaların bulunmaması nedeniyle),
3. Kolay bakım (ortak bir ev tipi kazana benzer şekilde) ve
4. Büyük yakıt esnekliği [11].

3.1.Isı Kaynağı

Isı kaynağı, foton elde etmek için kullanılan kaynaklardır. Çalışma sıcaklığı 1000oC ve 1500oC arasında olan ısı kaynakları TPV sistemlerde kullanılabilir [2].Bu kaynaklar arasında güneş ışığı, radyoaktif izotop (β -fotonları) ve alevli yanma sayılabilir. Isı kaynağından gelen ısı enerjisi ışınım yoluyla seçici yayıcı, filtre ve hücrelere geçmektedir. Isı kaynağı, fotovoltaiik hücrelere gelerek foton elde edilmesini sağlar. Planck yasasına göre ışımanın güç yoğunluğu sıcaklığın 4. Kuvvetiyle değiştiği için yeterli sıcaklığa ulaşmak oldukça önemlidir. Bu nedenle TPV sistemlerinde kullanılan ısı kaynakları genellikle yanmalı sistemler içerir [2].

3.2.Seçici Yayıcı

Seçici yayıcı, sistem verimini arttırmak için kullanılır. Seçici yayıcı, ısı kaynağından gelen ısıyı filtreler aktarmadan önce uygun alıcı hücre hassasiyetini sağlayarak yayılım spektrumuna çevirir. Çünkü alıcı hücreler sadece bant aralıklarının üstündeki bir enerjiyi absorbe ederek kullanabilirler. Bu durum da daha az miktarda elektrik üretimine sebep olmaktadır.

3.3.Filtre

Seçici yayıcıdan çıkan fotonlar hücrelere gelmeden önce filtreler ulaşılır. Filtreler seçici yayıcı ile benzer özellik gösterir. Yeterli enerjiye sahip olmayan ışıınmaları geri yansıtarak seçici yayıcıya geri gönderir. Böylece sistem verimi artırılmış olur.

3.4.Fotovoltaiik Hücreler

Fotovoltaiik hücreler; yayıcıdan gelen fotonları absorbe ederek termal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürler. Mümkün olduğunca çok fotonun soğurulması gereksinimi düşük bant aralığına sahip malzemelerin kullanımını zorunlu kılar [2].

TPV dönüştürücüleri üzerindeki çalışmalar, esas olarak silikon [12] ve germanyum dönüştürücüler [12] üzerine yoğunlaşmıştır. Bununla birlikte, bu elemental yarı iletkenlerin kalitesi zayıftır. Cihazlardaki etkileyici ilerleme, modern TPV cihazlarının yüksek performansa ve sonuçta bu "alana" olan ilginin tekrar canlanmasına yol açmıştır[12].Birden fazla fotovoltaiik hücre tipi bulunmaktadır. Genel olarak GaInAs ve GaInAsSb hücreleri kullanılmaktadır. Bu yarı iletken malzemelerin bant aralıkları birbirinden farklıdır. GaInAs bant aralığı 0,7 eV'a denk gelmektedir. Bu bant aralığı optimum verimlilik ve enerji için oldukça geniş bir skalaya sahiptir. Bu hücrelere ek olarak InGaSb ve InGaAsSb gibi dörtlü alaşım oluşturularak da elde edilir. InGaSb 0,5 eV bant aralığına sahiptir ve bu aralık oldukça dar bant aralığıdır. InGaAsSb ise elementlerin oranına bağlı olarak bant aralığı 0,38 eV-0,7 eV arasında ayarlanabilir.

4.ENDÜSTRİYEL SİSTEMLERDE TPV UYGULAMALARI

Termofotovoltaik dönüşümler endüstride birçok alanda kullanılmaktadır. Atık ısıların büyük ölçüde yer aldığı çelik endüstrisinin TPV uygulamaları bu çalışmada incelenmiştir.

4.1.Demir Çelik Endüstrisinde TPV Uygulamaları

TPV, yüksek sıcaklığa sahip bir ısı kaynağı gerektiren bir teknoloji olduğundan, böyle bir durumda bir prosesin işletildiği endüstrilerde kullanılabilir. TPV'nin basit bir uygulaması, cam veya çelik endüstrisi gibi yüksek sıcaklık endüstrilerinde atık ısı geri kazanımıdır. TPV hücresi vasıtasıyla atık ısı geri kazanımı örneği, çelik endüstrisinde sıcak haddelenmiş çelik levhaların sürekli olarak dökülmesi durumudur. Bu plakaların başlangıç sıcaklığı 1200 ° C ve 1000 ° C'den daha düşük bir sıcaklığa soğutulur. TPV hücreleri, soğutma işlemi sırasında sıcak plakaların üzerine konacaksa, emisyon işlemi yoluyla bir elektrik akımı üretilebilir[13]. Çelik endüstrisinde TPV uygulamasının etkisini göstermek için matematiksel bir model gerçekleştirilmiştir. Model, deneysel olarak ölçülen veriler doğrulanmıştır. Deneysel ölçümlerin desteklenmesi, modelin çelik endüstrisinde enerji geri kazanımının değerlendirilmesi için uygulanabilirliğini kanıtlamıştır[13].

Enerji Bakanlığı verilerine göre demir-çelik sektörü enerji kullanımı 2014 yılında nihai enerji tüketiminin %7,53'ünü, sanayi enerji tüketiminin %23,33'ü gibi önemli bir kısmını oluşturmuştur [2]. Tablo 2'de 2008-2014 döneminde Türkiye nihai, sanayi ve demir-çelik enerji tüketim değerleri gösterilmektedir.

Tablo 2. 2008-2014 Dönemi Türkiye Nihai, Sanayi ve Demir Çelik Enerji Tüketim Değerleri (BİN TEP) [2].

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Nihai Enerji Tüketimi	78269	79326	81987	86952	89007	89424	87131
Sanayi Tüketimi	26266	25424	29982	30929	30411	30137	28115
Demir Çelik	5054	5085	6536	7501	6189	6680	6561

Tablo 3. 2010-2014 Dönemi Çelik Enerji Tüketiminde Kullanılan Enerji Kaynakları ve Kullanım Değerleri (BİN TEP) [2].

	T.Köm	Linyit	Kok	Toplam K. Yakıt	Petrol	D. Gaz	Elektrik	Jeo. Isı Diğer Isı	Toplam
2010	1016	58	2904	3977	356	612	1425	166	6536
2011	591	30,9	2920	3885	27	1163	1489		7501
2012	510	28	2911	3421	48	832	1761	126	6189
2013	641		2941		14	1141	1792	145	6680
2014	586		3052		15	1129	1779		6561

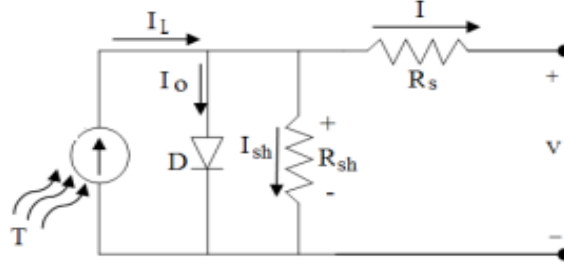
Çelik üretimi aşamasında büyük miktarda atık ısı meydana gelmektedir. Bu durum atık ısıının değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Atık ısıdan yararlanarak fotovoltaiik hücreler vasıtasıyla elektrik üretimi mümkündür.

Türkiye'de demir-çelik sektöründe TPV uygulamaları ile enerji verimliliğinin sağlanabildiği belirlenmiştir. Demir çelik endüstrisinde yıllık TPV sistemleri ile kurtarılabılır enerji potansiyeli 11,44 TJ, enerji verimliliği GaSb hücreli TPV sistemlerinde %2.04 ve InGaAsSb hücreli TPV sistemlerinde ise %7.31 olduğu belirlenmiştir [2].

Demir çelik endüstrisinden elde edilen atık ısı miktarı fazlalığı, makine, inşaat, otomotiv sektörü ve elektrikli ürünlerde çelik ürünlerinin geri dönüşümleri daha fazla olduğundan endüstriyel alanlardan elde edilen atık ısılara, TPV uygulamalarının yapılması daha uygun görülmüştür.

4.2. Termofotovoltaik Model ve Hesaplamalar

Fotovoltaik sistemin eşdeğer devresi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.



Şekil 2. Fotodiyot eşdeğer devresi

Işınım ile orantılı hücre ışık akımı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$I_{ph} = \int_0^{\lambda_{max}} q \cdot S \cdot F(\lambda) \cdot SR(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

Burada λ uyarıcı fotonun dalga boyudur. q elektron yükü, λ_{max} bant boşluğu enerjisine karşılık gelen kesim dalga boyudur. $SR(\lambda)$ ise azaltılmış bölge beyz ve emiterin toplamıyla verilen TPV hücresinin iç spektral karşılığıdır. $F(\lambda)$, TPV hücresi tarafından absorbe edilen gelen ışımın spektral foton akısıdır. $\lambda < \lambda_{max}$ için $F(\lambda)$ aşağıdaki gibi hesaplanır [2];

$$F(\lambda) = \chi \cdot \frac{2\pi \cdot c}{\lambda^4 \left[e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right]} \quad (2)$$

Burada T_{Rad} TPV radyatör sıcaklığı, h planck sabiti, c ışık hızı, k boltzmann sabiti, χ TPV sistemindeki spektral kontrol performansını karakterize eden etkin boşluk yayma kuvvetidir. Bunun değeri en iyi rapor edilen spektral kontrol sistem performanslarına göre 0,78 alınmıştır [2].

Bir TPV sistemin I-V karakteristiği aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$I = I_L - I_0 \left[\frac{q}{e^{nKT}} (V + IR_s) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

Burada I_L ışınım ile orantılı akım, R_s seri direnci, R_{sh} paralel direnci temsil eder [2]. Açık devre gerilimi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$V_{oc} = \frac{nKT_{cell}}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (4)$$

Burada n ideallik faktörü, T_{cell} hücre sıcaklığı, I_0 ters doyum akımını ifade eder.

$$V_{mp} = V_{oc} - \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{V_{mp}}{kT/q} + 1 \right] \quad (5)$$

Doluluk oranı maksimum gücün, kısa devre akımı ve açık devre geriliminin çarpımına oranından hesaplanır:

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (6)$$

Bir TPV sisteminin verimliliği aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\eta = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{P_{inc} - P_{het}} \quad (7)$$

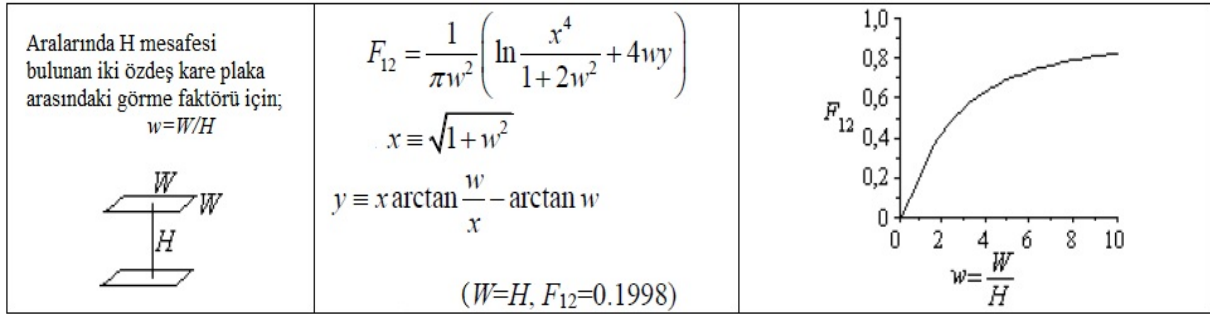
Burada Pınc fotovoltaiik hücreye gelen ışınım gücünü, Pret hücre tarafından yansıtılan gücü ifade eder.

Sistemin enerji verimliliği aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\eta_s = \frac{P_{cell}}{P_{inc}} \quad (8)$$

Burada η_s sistem verimliliğini, Pcell TPV sistem tarafından üretilen gücü ifade eder.

Spektral kontrol için bir diğer önemli parametre IR emitter ve IR PV katman arasındaki iyi bir görme faktörüdür. Şekil 3' de, emitter genişliği olan W'nin, dielektrik filtre ve IR emitter arasındaki mesafe olan H'a oranı F12 görme faktörünün bir fonksiyonu olduğu gösterilmiştir. Şekil 3'den anlaşılacağı üzere W/H oranı 8 değerinden büyük ise görme faktörü % 80'nin üstünde bir değer olacaktır [2].

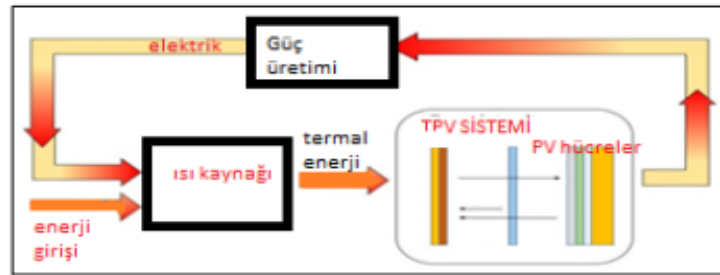


Şekil 3. Demir-Çelik Sanayi TPV Uygulamaları İçin Yüksek Görme Faktörü [2].

5.TEORİK UYGULAMA

Çalışmamızda endüstriyel sistemlerde kullanılmak üzere bir teorik modelleme yapılmıştır. Bu model demir çelik sektöründe kullanılmak ve bu sektörde çıkan atık ısılar değerlendirilmek üzere tasarlanmıştır.

Şekil 4' te TPV sisteminin demir-çelik sektöründe uygulanması durumundaki enerji dönüşümü ile ilgili şematik bir resim gösterilmiştir.



Şekil 4. Demir-çelik sektöründeki TPV uygulaması ile enerji geri dönüşümü

Uygulamada fotovoltaiik hücre olarak GaSb ve InGaAsSb hücresi kullanılmıştır. Hücre parametreleri olarak enerji bant aralığı, hücre alanı, akseptör yoğunluğu ve donör yoğunluğu alınmıştır. Bant aralıklarının sıcaklıkla değişimi hesaplanarak verim değerlendirilmesi yapılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan 300 K hücre sıcaklığındaki sabit parametreler Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Sabit Hücre Parametreleri [2].

	Eg (eV) Enerji bant aralığı	S (cm ²) Hücre alanı	X	Na (cm ⁻³) Akseptör yoğunluğu	Nd (cm ⁻³) Donör yoğunluğu	Io(A)
GaSb	0.72	1	0.7	5x10 ¹⁹	2x10 ¹⁸	1.26x10 ⁻¹⁰
In _{0.2} Ga _{0.8} As _{0.18} Sb _{0.82}	0.555		8	2x10 ¹⁹		1.91x10 ⁻⁷

1256 K radyatör sıcaklığında, 300 K hücre sıcaklığında ve ideal koşullarda TPV sistem verimlerinin, GaSb hücrede %22,17 ve In_{0.2}Ga_{0.8}As_{0.18}Sb_{0.82} hücrede %27,96 olduğunu hesaplamıştık. Sistem verimliliği, üretilen enerjinin absorbe edilen enerjiye oranı ile elde edilirken, enerji verimliliği üretilen enerjinin kurtarılabılır potansiyeldeki tüm enerjiye oranı ile hesaplanır. Dolayısıyla sistem verimliliklerinin benzer görüntüler sergilemesi enerji verimliliği sonuçlarını yansıtmaz, enerji verimliliği GaSb hücreli TPV sistemlerinde %2,04 ve In_{0.2}Ga_{0.8}As_{0.18}Sb_{0.82} hücreli TPV sistemlerinde %7,31 olarak hesaplanmıştır.

GaSb ve In_{0.2}Ga_{0.8}As_{0.18}Sb_{0.82} hücrelerinin bant aralıklarının sıcaklıkla değişimi denklem 9 ve 10'da verildiği gibi hesaplanır [2].

$$E_g(\text{GaSb}) = 0.7276 - (3.990 \times 10^{-4})(T - 300) \quad (9)$$

$$E_g(\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}) = 0.5548 - (1.952 \times 10^{-4})(T - 300) \quad (10)$$

Işımada seçici yayıcı ve filtreden geçen dalga boyu büyük ışımların veya çalışma ortamının sıcaklığının oda sıcaklığından yüksek olması durumunda hücrelerde ısınma ihtimaline karşın, normal koşullarda, hücrenin ısınması ve soğutulması durumlarında verimlerin değişikliklerinin gözlemlenmesine ilişkin yapılan çalışmada, hücre sıcaklığının artması durumunda verimin düştüğü görülmüştür [2].

TPV sistemlerinde kullandığımız hücre tiplerine ideal seçici yayıcıların ve filtrelerin kullanıldığı durumda kaynak sıcaklıklarına bağlı olarak hücre yüzeyine gelen ve yansıtılan güç değerleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Radyatör Sıcaklığına Bağlı Olarak Hücreye Gelen ve Hücreden Yansıtılan Güç Değerleri

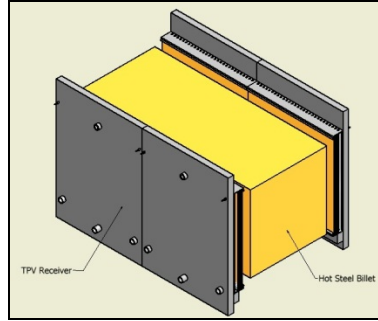
GaSb	Trad (K)	1256	1473	1973	InGaAsSb	Trad	1256	1473	1973
	Pret (W/m ²)	9.96	17.27	42.90		Pret (W/m ²)	8.1	13.23	33.03
	Pinc (W/m ²)	10.97	20.75	66.80		Pinc (W/m ²)	10.97	20.75	66.80

5.1. Türkiye Demir-Çelik Sektörü Atık Isı Enerji Potansiyeli ve TPV Sisteminin Uygulanması

2011 yılı Türkiye demir-çelik sektörüne ait düşük, orta ve yüksek sıcaklık değerlerinde atık ısı salınımı yapan enerji kaynakları, bu kaynakların enerji tüketimindeki payları ve kurtarılabılır atık ısı enerjisi potansiyeli Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. 2011 Yılı Türkiye Demir-Çelik Sektörünün Atık Isı Enerjisi Potansiyeli

Demir-çelik sektörü	Tp Sıcaklık Sınıfı	T p	Elektri k	Petrol	Elektrik Tüketi m	Petrol Tüketi mi	Atık Enerji (Elektrik)	Atık Enerji (Petro l)	Toplam Düşük Sıcaklık lı Atık Isı	Toplam Orta Sıcaklık lı Atık Isı	Toplam Yüksek Sıcaklık lı Atık Isı	Topla m Atık Enerji
		C	(%)	(%)	(PJ)	(PJ)	(PJ)	(PJ)	(PJ)	(PJ)	(PJ)	(PJ)
	Düşük	45	4.2	0	3.05		0.00	0.00	0.00			147.29
	Orta	0	0	0			0.00	0.00		0.00		
	Yüksek	983	95.8	100	69.73	252.75	20.92	126.38			147.29	



Şekil 5. Akkor Halindeki Çeliğin İki Yüzeyine Yerleştirilmiş 4 Düzlemsel TPV Modülü

Teorik hesaplamalarda kullanacağımız hesaplamalar için referans aldığımız çelik kütüğün ölçüleri 0,16m x 0,16m ebatlarında ve 5,6m uzunluğunda olup ağırlığı 1MT'a eşittir. Türkiye çelik üretimi bakımından 2014 yılı üretimi 34,04 milyon metrik tondur. Saatlik üretim olarak hesaplırsak bu değer yaklaşık 3940 adet kütüğe eşittir.

Şekil 5' de şematik olarak gösterilen TPV modülü kütüklerin her iki yüzeyine uygun koşullarında yerleştirildiği takdirde, TPV modül alanının 0,15m x 0,15m ve 5,6m uzunluk boyunca uygulandığını varsayarsak bu bize 6619,2 m² gibi bir alan verecektir. GaSb termofotovoltaik hücreler yüksek kızılötesi radyant enerjiye maruz kaldıklarında 1W/cm² gibi bir güç üretmektedir. Bulduğumuz alan değeriyle birlikte hesapladığımızda, Türkiye demir-çelik sektöründeki atık ısıyı enerji potansiyelinden geri kazanılabilir güç yaklaşık olarak 66,192 MW diyebiliriz. Hesaplamalarda GaSb yerine InGaAsSb hücre kullandığımız takdirde üretilen güç 2,87W/cm²'dir. Bu durumda üretilen toplam güç yaklaşık olarak 189,971 MW olacaktır.

Tablo 7. Türkiye Demir-Çelik Sektörünün Atık Isınım Enerjilerinin TPV Sistemleri ile Geri Kazanımı ve Verimliliği

Sektör	Isınım Yayı n	Hücre Sıcaklı ığı	Dalga Boyu (µm)	Siyah Cisim Isınım	Refer ans Alına n	Çelik Kütük Adedi	TPV Siste m	Hücre Tipi	TPV ile Geri Kaza
Demir Çelik Sektö rü	1256	300	0,4-1,8	3,4	0,16x0,16	3940	6619,2	GaSb	66,192
								InGaAsSb	189,971

1256 K radyatör sıcaklığında, 300 K hücre sıcaklığında ve ideal koşullarda TPV sistem verimlerinin, GaSb hücrede %22,17 ve $\text{In}_0.2\text{Ga}_0.8\text{As}_0.18\text{Sb}_0.82$ hücrede %27,96 olduğunu hesaplamıştık. Tablo 7. de Türkiye demir-çelik sektörünün atık ısıyı enerjilerinin TPV sistemleri ile geri kazanımı ve verimliliği gösterilmektedir. Sistem verimliliği üretilen enerjinin absorbe edilen enerjiye oranı ile elde edilirken, enerji verimliliği üretilen enerjinin kurtarılabılır potansiyeldeki tüm enerjiye oranı ile hesaplanır. Dolayısıyla sistem verimliliklerinin benzer görüntüler sergilemesi enerji verimliliği sonuçlarını yansıtmaz, enerji verimliliği GaSb hücreli TPV sistemlerinde %2,04 ve $\text{In}_0.2\text{Ga}_0.8\text{As}_0.18\text{Sb}_0.82$ hücreli TPV sistemlerinde %7,31 olarak hesaplanmıştır.

6. SONUÇ

Endüstriyel sistemlerde meydana gelen yüksek sıcaklıklı atık ısı miktarı büyük ölçüde önem kazanmaktadır. Mevcut atık ısıların değerlendirilmesiyle elektrik üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Böylece hem atık ısıların geri kazanımı sağlanır hem de mevcut elektrik üretimine alternatif getirilmiş olunur.

Bu çalışmada endüstriyel sistem olan çelik endüstrisi üzerine TPV uygulaması yapılmıştır. Türkiye’de önemli bir paya sahip olan bu endüstrideki yüksek sıcaklıklı atık ısı kullanılarak elektrik enerjisi elde edilmiştir. Elektrik üretimi için gerekli olan atık ısı kaynağı, seçici yayıcı, filtre ve hücredir. Bu hücreler, yayıcıdan gelen fotonları absorbe ederek termal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürler. Yapılan çalışmada, termofotovoltaik sistemlerde, hücre sıcaklığı, hücre tipi, radyatör sıcaklığı parametrelerinin hücre verimliliğine etkileri incelenmiştir.

Yapılan çalışma doğrultusunda $\text{In}_0.2\text{Ga}_0.8\text{As}_0.18\text{Sb}_0.82$ hücresi, aynı kaynak sıcaklığında GaSb hücresi ile kıyaslandığında verimliliği daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, ters doyum akımının ve enerji bant aralığının düşük, kısa devre akımının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. TPV enerji dönüşüm sistemlerinde demir-çelik proseslerinden salınan yüksek sıcaklıklı atık ısı kaynaklarının, farklı hücre yapılarının ve diğer hücre parametrelerinin enerji dönüşümü üzerindeki etkileri hesaplanmıştır. TPV sistemlerinin Türkiye demir-çelik sektöründeki atık ısı enerji potansiyeli için uygulanması durumunda GaSb hücreli sistemlerin %2,04 enerji verimliliği ile yıllık 66,192 MJ, $\text{In}_0.2\text{Ga}_0.8\text{As}_0.18\text{Sb}_0.82$ hücreli sistemlerin %7,31 enerji verimliliği ile yıllık 189,971 MJ enerjiyi kurtarabileceği hesaplanmıştır. Bu uygulama demir-çelik sektörü içinde, elektrik üretirken aynı zamanda yakılan yakıt miktarını azaltarak çevre kirliliğinin de bir miktar önüne geçebilir. TPV sistemlerinin günümüzde yaygın olarak kullanılan PV sistemlerinden en önemli 2 avantajı vardır. Bunlardan birincisi hücrelerin bant aralıklarının farklı olması sebebiyle daha verimli elektrik üreterek yüksek güç yoğunluğuna sahip olmasıdır. Bir diğer avantajı ise PV sistemlerin güneşi gün içerisinde sadece 8 saat kullanabilmesine rağmen TPV sistemleri demir-çelik gibi sürekli proseslerde 24 saat elektrik üretebilir. Elde veriler doğrultusunda TPV uygulamalarının endüstriyel sistemlere uygulanabileceği, enerji verimliliği sağladığı ve elektrik üretimine alternatif getirdiği belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK 1001 kapsamında yürütülen 114R088 nolu "Isıl Sistemlerde Mevcut Atık Isı Potansiyelinden Yararlanarak Termofotovoltaik Yöntemlerle Elektrik Enerjisi Üretim Teknolojisinin Geliştirilmesi" adlı projeden üretilmiştir. Projeye vermiş oldukları desteklerden dolayı TÜBİTAK a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1]. Yıldırım, İ., Öner, D., Çetin, B. (2015). "GPU-computation of 2-dimensional Laplace Equation using Boundary Element Method", 20th National Conference on Thermal Sciences (ULIBTK'15), September 2-5, Balıkesir, Turkey.
- [2]. Utlu, Z., & Hepbasli, A. (2007). A review and assessment of the energy utilization efficiency in the Turkish industrial sector using energy and exergy analysis method. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11(7), 1438-1459.
- [3]. Steinhuser, A., Hille, G., Kugele, R., Roth, W., & Schulz, W. (1999, June). Photovoltaic-hybrid power supply for radio network components. In Telecommunication Energy Conference, 1999. INTELEC'99. The 21st International (p. 142). IEEE.
- [4]. Lodhi, M. A. K., Vijayaraghavan, P., & Daloglu, A. (2001). An overview of advanced space/terrestrial power generation device: AMTEC. Journal of Power Sources, 103(1), 25-33.
- [5]. National Research Council. (2001). Thermionics Quo Vadis?: An Assessment of the DTRA's Advanced Thermionics Research and Development Program. National Academies Press.
- [6]. Bauer, T. (2011). Applications of TPV Generators. In Thermophotovoltaics (pp. 147-196). Springer Berlin Heidelberg.
- [7]. Volz, W. (2001). Entwicklung und Aufbau eines thermophotovoltaischen Energiewandlers (Doctoral dissertation).
- [8]. Horne, E. (2002). Hybrid thermophotovoltaic power systems. EDTEK. Inc., US, Consultant Report, P500-02-048F.
- [9]. Fraas, L. M., Avery, J. E., Huang, H. X., & Martinelli, R. U. (2003). Thermophotovoltaic system configurations and spectral control. Semiconductor Science and Technology, 18(5), S165.
- [10]. Yamaguchi, H., & Yamaguchi, M. (1999, March). Thermophotovoltaic potential applications for civilian and industrial use in Japan. In E. Arimondo, & C. S. Allman (Eds.), AIP Conference Proceedings (Vol. 460, No. 1, pp. 17-29). AIP.
- [11]. Ferrari, C., Melino, F., Pinelli, M., & Spina, P. R. (2014). Thermophotovoltaic energy conversion: Analytical aspects, prototypes and experiences. Applied Energy, 113, 1717-1730.
- [12]. Ferrari, C., Melino, F., Pinelli, M., Spina, P. R., & Venturini, M. (2014). Overview and status of thermophotovoltaic systems. Energy Procedia, 45, 160-169.
- [13]. Shoaee, E. (2016). Performance assessment of thermophotovoltaic application in steel industry. Solar Energy Materials and Solar Cells, 157, 55-64.

ÖZGEÇMİŞ

Büşra Selenay ÖNAL

13 Şubat 1993 tarihinde Balıkesir'de doğmuştur. 2012 yılında Rahmi Kula Anadolu Lisesinden mezun olmuştur. 2016 yılında İstanbul Aydın Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünü üniversite 1.sı olarak bitirmiştir. İstanbul Aydın Üniversitesi'nde araştırma projelerinde görev yapmaktadır. 2016 yılında İstanbul Aydın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği anabilim dalında yüksek lisans öğrenimine başlamıştır.

Zafer UTLU

1966 Isparta doğumludur. Ege Üniversitesinden 1999 yılında Yüksek Lisans ve 2003 yılında Doktora çalışmalarını tamamlamıştır. 2010 Yılında Makine Mühendisliği alanında Doçent olmuştur. 2010 yılından beri İstanbul Aydın Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Öğretim Üyesi olarak çalışmaktadır. 2015 Yılında Termodinamik alanında "Profesör" olmuştur. Çalışma alanlarının bir bölümü; Termodinamik, Isıl Sistemler, Atık ısı Uygulamaları, Yenilebilir Enerji Uygulamaları, Isıl sistemlerin enerji, ekserji ve eksergoekonomik analizi, biodizel yakıt üretim sistemleri, Sıfır enerjili bina sistemleridir.