



## Yoğunlaştırılmış Bütünleşik Işınım Ayrıştırımlı PV/T Sistemlerinin Enerji ve Ekserji Analizi

### Energy and Exergy Analysis of Concentrated PV/T Systems with Beam Splitting

Ömer Resuloğulları<sup>1</sup> , Ali Erişen<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Ostim Teknik Üniversitesi, Ostim, Yenimahalle, Ankara, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 14/02/2022

Kabul/Accepted: 27/05/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

#### Öz

Güneş enerjisi sistemlerinde, en yüksek teknoloji ve maliyet değerine sahip olan fotovoltaik modüllerin kullanımı söz konusudur. Bunların etkin ve yoğun kullanılması için önerilen yöntem, yutulmuş tabakası aracılığıyla ışınım ayrıştırımlı PV/T sistemleridir. Bu çalışmada, sistem parametrelerinden, yutulmuş ünitesi kalınlığı, akışkan debisi ve ışınım şiddeti değişimlerinin sisteme olan etkileri incelenmiştir. Sırasıyla, yutulmuş ünitesi kalınlığının artırılmasıyla fotovoltaik modüle ulaşan ışınımın daha yüksek verimde elektrik üretimi, akış debisinin artırılmasıyla sistemde ekserji artışı sağlanabileceği belirlenmiştir. Ayrıca, ışınım şiddetinin artırılmasıyla da, sistemde ısı kazanımlarının ve dolayısıyla bu kazanımlara dayalı ekserji artışlarının olabileceği gösterilmiştir.

#### Anahtar Kelimeler

“Işınım Ayrıştırma, Optik Analiz, HAD Analizi, Yoğunlaştırılmış Fotovoltaik”

#### Abstract

The effects of the changes in absorption unit thickness, fluid flow rate and radiation intensity parameters of the Radiation decomposition PV/T systems are examined through the absorption layer, which is recommended for the effective and intensive use of photovoltaic modules, which have the highest technology and cost value in solar energy systems. It has been shown that radiation can provide higher efficiency electricity production. It has been determined that exergy production can be increased in the system by increasing the flow rate.

#### Key Words

“Beam Splitting, Optical Analysis, CFD Analysis, Concentrated Photovoltaic”

## 1.Giriş

Birincil enerji kaynağı olarak kullanılan fosil yakıtların gelecekte kısıtlı potansiyellerinden dolayı enerji ihtiyacını karşılayamayacağı ve sebep oldukları çevresel zararlardan dolayı daha temiz ve sürdürülebilir enerji sistemlerine yönelim olduğu görülmektedir. Tüm enerji sistemleri içerisinde, Güneş Enerji Sistemleri (GES), çevre dostu olmaları ve sürdürülebilirlik açısından öne çıkmaktadır. Isıl Güneş enerji sistemleri evsel, tarım ve endüstriyel alanlarda kullanılmakta olup günümüzde yaygın kullanım amacı evsel sıcak su ihtiyacını karşılamaktır. Elektrik üreten Güneş enerji sistemleri ise şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız olarak elektrik ihtiyacını karşılamak için kullanılmaktadır. Yarı iletkenlerin Güneşten gelen fotonların enerjilerini yutarak akım oluşturması esasına dayalı çalışan fotovoltaik enerji sistemlerinin günümüzde ticari ürün verimleri % 24 ile sınırlı olup; laboratuvar koşullarında % 48 elektrik dönüşüm verimlerine ulaşılmıştır. Yeryüzünde birim alana ( $m^2$ ) düşen ışınım şiddetinin 1065 W ile sınırlı olması sebebiyle birim enerji dönüşüm alanından alınabilecek enerji miktarı kısıtlıdır. Yoğunlaştırılmış ışınım kullanan Güneş enerji sistemlerinde, yansıtıcı veya kırıcı optik eleman aracılığıyla, enerji dönüşüm alanına daha fazla ışınım düşürme amaçlanmakta olup; yoğun ışınım, fotovoltaik dönüşümde oluşacak akımı arttırmasının yanı sıra açık devre voltajını da arttırarak sistem verimini arttırmaktadır. Diğer taraftan yoğunlaştırılmış ışınımın fotovoltaik modül sıcaklığını arttırarak sistem verimini düşürdüğü bilinmektedir. Bu problemin çözümü için önerilen fotovoltaik modülün arka yüzeyinden su ile soğutma kanalı yerleştirilmesi, fotovoltaik modül sıcaklığını düşürerek elektrik üretim verimini arttırabileceği gibi, soğutma için kullanılan suda depolanacak ısı enerji, sistemde faydalı hale getirilebilir. Bu soğutma sistemine ek olarak, fotovoltaik modülde akım üretme potansiyeli olmayan uzun dalga boylu düşük enerji kapasiteli ışınım, modülde sıcaklık artışını engelleyecek şekilde, modüle ulaşmadan yutulmuş, ısı sistem faydası sağlanabilir. Fotovoltaik modülün soğutulmasını ve uzun dalgaboylu ışınımın yutulmasını sağlayacak bileşenleri kapsayan sisteme ait, enerji ve ekserji anaizi bu çalışmanın konusunu oluşturmaktadır. Literatürde rastlanan benzer çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Bergene T. ve Lovvik OM., (1995) PV/T sistem performansını, sayısal ısı transfer modeliyle belirlemiş oldukları çalışmada Duffie JA. ve Bechman WA., (1991) düz güneş enerjisi toplayıcılarını da kapsayan analizler yapmışlardır. Toplam sistem verimlerinin % 60 ile % 80 arasında değiştiğini göstermişlerdir.

Ji J. ve arkadaşları (2007) dış ortam şartlarında alüminyum alaşım ısı değiştirici kullandıkları PV/T sisteminde panel sıcaklığının düşmesiyle elektrik veriminin arttığını gösterdikleri çalışmada, dış ortam koşullarında % 45 ısı ve % 10 elektrik verimliliklerini ve suyun panel altından çıkış sıcaklığını 28 °C olarak ölçmüşlerdir.

Hatwaambo ve arkadaşları (2008) düşük yoğunluklu fotovoltaik sistemin performansının, yarı dağınık olarak haddelenmiş yansıtıcı elemanlar kullanılarak geliştirilmesini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar, solar modül hücresinin düzlemine paralel olarak reflektör üzerindeki dağınık haddelemenin daha uniform bir ışın dağılımı sağlayarak fotovoltaik sistemin performansını artırdığını göstermiştir.

Tripathi R. ve arkadaşları (2018) dört sistem için kısmen kapalı fotovoltaik termal bileşik parabolik yoğunlaştırıcıların (PVT-CPC), fotovoltaik termal (PVT) yoğunlaştırıcıların, bileşik parabolik yoğunlaştırıcıların (CPC) ve seri olarak bağlanmış düz plaka toplayıcılarının (FPC) enerji ve ekserji performansı arasında karşılaştırmalı analizini yapmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda PVT-CPC sistemin diğer sistemlere göre ısınmasına rağmen soğutulmuş daha fazla performans elde edilmiştir.

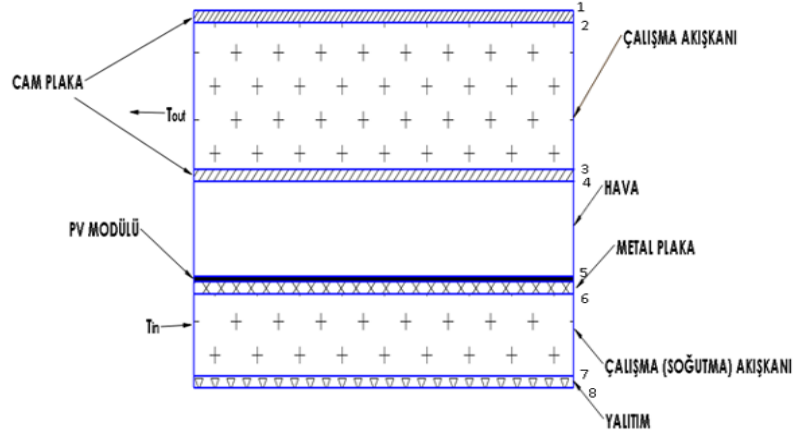
Gang Wang ve arkadaşları (2019) Lineer Fresnel yansıtıcı yoğunlaştırılmış ışınım kullanılan sistemlerinde PV panel ön yüzeyine yerleştirdikleri 380-1100 nm aralığındaki ışınımı geçiren diğer dalga boylarındaki ışınımı dağıtan sistemleriyle % 51,2'lik optik verime ulaşmışlardır. Çalışmalarında lineer fresnel lens kullanımı ve güneş takibiyle ilgili optik kayıplar olduğunu ön görmüşlerdir. Toplam verim açısından düşük kalan bu gibi sistemler optik ve ısı açıdan geliştirilmeye açıktırlar.

Zhao J. ve arkadaşları (2011) PV panel üst yüzeyine yerleştirilen su ve içeriğini vermedikleri optimize edilmiş bir akışkanla güneş ışığını soğurarak panele gelmesini sağlayan bir sistem için 1-B matematiksel model oluşturmuşlardır. Optimize ettikleri akışkanla kızılötesi ışınımın % 92 sinin yutulduğu, görünür ışınımın (400-800 nm) % 89 geçirilip PV yüzeyine ulaştığı sistemlerinde, toplam verimin ışınım yoğunluğuna göre değiştiğini, değerinin % 60- % 67 aralığında olduğunu ve ısı sistemin çıkış sıcaklığının 196 ° C olduğunu belirlemişlerdir. Sistemin en büyük avantajının, kullanılabilirlik veriminin % 12 lerden % 22 lere çıkarılması olduğunu yorumunu yapmışlardır.

Smith ve arkadaşları (2014) yoğunlaştırılmış Güneş ışınımı altında PV hücrelerini ön taraftan sprey su ile soğutmuşlardır. Çalışmalarında, mono kristalin PV panel kullanmışlardır. Sürekli su soğutması sonucunda pompanın güç tüketimi de göz önüne alındığında net güç kazancının % 4,6 olduğunu göstermişlerdir. Bu çalışmada aktif soğutma yöntemi ele alınmıştır. Bu bağlamda bir mono kristalin PV hücresinin hem soğutmasız hem de soğutma olması durumunda yüzey sıcaklığının ne olacağı HAD analizi ile araştırılmıştır. PV hücresinin 230 W/m<sup>2</sup> ile 980 W/m<sup>2</sup> değerleri arasında değişen Güneş ışınımını altında olduğu varsayılmıştır. Her bir ışınım değeri için beş farklı kütleli debide analizler gerçekleştirilmiştir .

## 1. Materyal ve Yöntem

Bu çalışma kapsamında, Şekil 1’de şeması verilen PV/T sistemi için Optik Analiz Programı kullanılarak sistem katmanlarında geçirilen ve yutulan enerji miktarları bulunmuş, elde edilen veriler Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (ANSYS) Programında sınır şartları olarak kullanılıp, kolektör yutulmuş ve soğutma katmanlarında çıkış sıcaklığı bulunmuştur. Yutulmuş ünitesi, iki cam plaka arasında çalışma akışkanı olarak suyun farklı katman kalınlıklarında bulunduğu bölge olarak tasarlanmış olup, soğutma ünitesi fotovoltaik modül altına yerleştirilen 2 cm kalınlıklı 1-1 m ölçülerinde bölge olarak tasarlanmıştır. Bu kısımda gerçekleştirilen modelleme çalışmasında güneş ışınlarının geliş açısı  $0^\circ$  olarak, güneş ışınlarının dik geldiği an için yapılmıştır.



Şekil 1. Işınım Ayrıştırımlı PV/T Sistem şeması

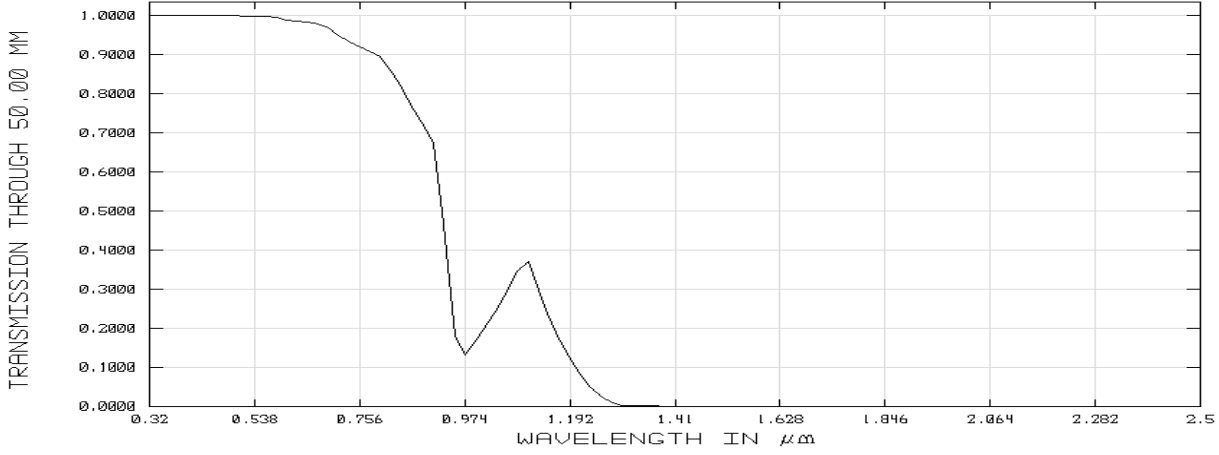
Çalışmada ışık kaynağı,  $800 \text{ W/m}^2$  ışınım akısına sahip  $10 \times 10 \text{ m}$  ölçülerinde güneşin 1,5 AM spektrisine uygun spektral saçılıma sahip dikdörtgen ışık bir yüzeyle modellenmiş olup, ışık kaynağı için kullanılan dalgaboyları ve ağırlık fonksiyonları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Işık kaynağı spektral ağırlık fonksiyonu

Dalga boyu $\mu\text{m}$	Ağırlık Fonksiyonu	Dalga boyu $\mu\text{m}$	Ağırlık Fonksiyonu
0,34	0,306596	0,8	0,855869
0,36	0,357791	0,84	0,81471
0,4	0,537107	0,92	0,735842
0,42	0,668764	0,96	0,698617
0,46	0,878149	1	0,710833
0,48	0,894947	1,1	0,596818
0,52	0,907741	1,3	0,524489
0,54	0,956974	1,5	0,421573
0,58	1	1,8	0,295243
0,6	0,990259	2	0,172895
0,68	0,956336	2,3	0,147168
0,72	0,916374		

Işın izleme metoduyla yapılan tasarım için ışın kaynağından programın üst limiti olan  $4 \times 10^9$  ışın ile optik analiz yapılmış olup sistem geometrisinin 1000 ışınlık şeması Şekil 2’de gösterilmiştir.





INTERNAL TRANSMISSION VS. WAVELENGTH

FRI DEC 18 2020

TRANSMISSION THROUGH 50.00 MM

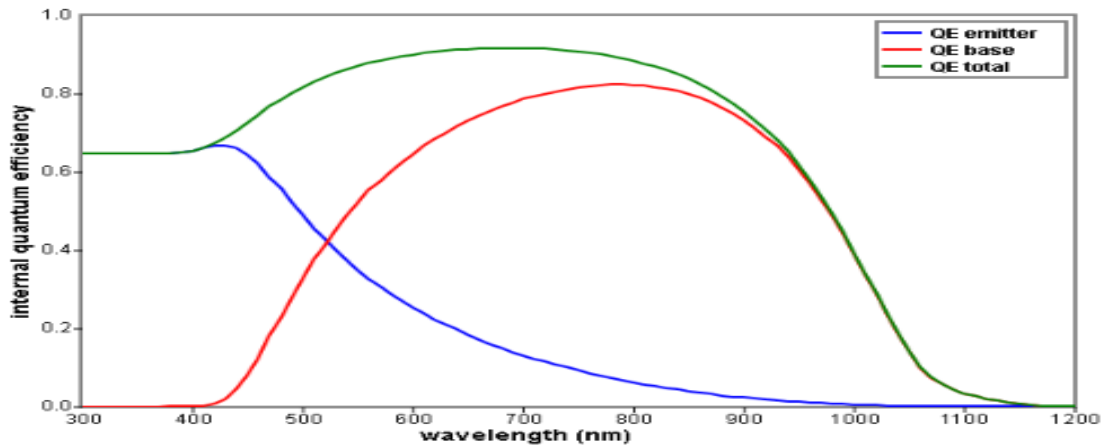
0.34.ZMX  
CONFIGURATION 1 OF 1

Şekil 4. Suyun farklı dalgaboylarındaki geçirgenliği

Fotovoltaik panel 1x1 m ölçülerinde dalgaboyundan bağımsız 0.02 yansıtıcılık ve 0.98 yutuculuk katsayılarına sahip düzgün saçılımlı yüzey kaplamalı olarak tasarlanmıştır. Işınım şiddeti sayımı; üst cam üstü, su tabakası üstü, su tabakası altı ve fotovoltaik panel yüzeyi konumlarına dedektörler yerleştirilerek yapılmıştır.

Şekil 1'de şeması verilen üst ısı bölgede, ışınım yutulmasını sağlayacak akışkan, alt soğutma bölgesinde fotovoltaik panelde oluşacak ısının aktarıldığı akışkan olan 25 °C giriş sıcaklığındaki su olarak tasarlanmıştır. Fotovoltaik panelin soğutulmasında kullanılan su akışı ve aynı zamanda, ısı bölge girişini besleyen akış olarak alınmıştır. Optik analiz bölümünden suyun ışınım yutulumu ve fotovoltaik panele gelen ışınım değerleri kullanılacak olup 50 mm kalınlığındaki su tabakası tasarımı referans alınacaktır.

Fotovoltaik panelden soğutucu akışkana geçecek ısı miktarı panel verimi ile ilişkilidir. Panel verimini etkileyen en önemli parametre olan kuantum verimi panelin farklı dalgaboylarındaki Spektal yanıtını oluşturan parametre olarak bilinmektedir. Bu çalışmada Sun Power firmasının 1.5 AM standartlarında ; 68.6 V potansiyel ve 6.12 Amperlik kısa devre akımına sahip, %79.1 dolgu faktörü ve %18 elektrik dönüşüm verimine sahip paneli farklı dalgaboylu ışınım altında kuantum verimi bilindiğinden referans olarak alınmıştır. Şekil 5'te panelin farklı dalgaboylu ışınım altında içsel kuantum verimi verilmiştir.



Şekil 5. Referans panelin içsel kuantum verimleri

300- 1200 nm dalgaboyu aralıklarında ( $\Delta\lambda = 10$  nm için) farklı kalınlıklarda su tabakası altında düzeltilmiş fotovoltaiik panel verimi Denklem (1)'de verilmiştir.

$$\eta_d = \eta_{ref} \frac{\sum_{\lambda=300}^{1200} I_{\lambda}(IQE)_{\lambda} \Gamma e^{-\alpha_{\lambda} L}}{\sum_{\lambda=300}^{1200} I_{\lambda}(IQE)_{\lambda}} \quad (1)$$

Yukarıda verilen eşitlikte  $\eta_{ref}$  referans verimi,  $I_{\lambda}$  spektral ışınım değerini,  $(IQE)_{\lambda}$  içsel kuantum verimini,  $\Gamma$  optik kayıp katsayısını,  $\alpha_{\lambda}$  spektral yutulum katsayısını ve  $L$  su tabakası kalınlığını göstermektedir. Farklı su tabakası kalınlıkları altında panel verimleri ve panel elektrik üretim değerleri hesaplanarak panelde açığa çıkan ısı miktarları hesaplanmış ve 50 mm'lik yutulum ünitesi kalınlığı değerleri için bu değer soğutma ünitesi için yüzeysel ısı akısı olarak sınır şartlarında tanımlanmıştır.

Isıl analizlerde, soğutma ünitesi girişine 25 ° C sıcaklığında, sırasıyla 64, 128 ve 256 kg/h debilerinde su akışı laminer akış şartlarında girş yapmakta olup, soğutma ünitesi çıkış sıcaklıkları yutulum ünitesi giriş sıcaklıkları olarak alınmıştır. Yoğunlaştırılmış ışınım tasarımları için 64 kg/h debi durumunda sırasıyla, 800, 1600, 2400 ve 4000 W/m<sup>2</sup> lik ışınım akısı durumlarını çözümlenmiş olup bulgular bir sonraki bölümde verilmiştir.

## 2. Bulgular ve Tartışma

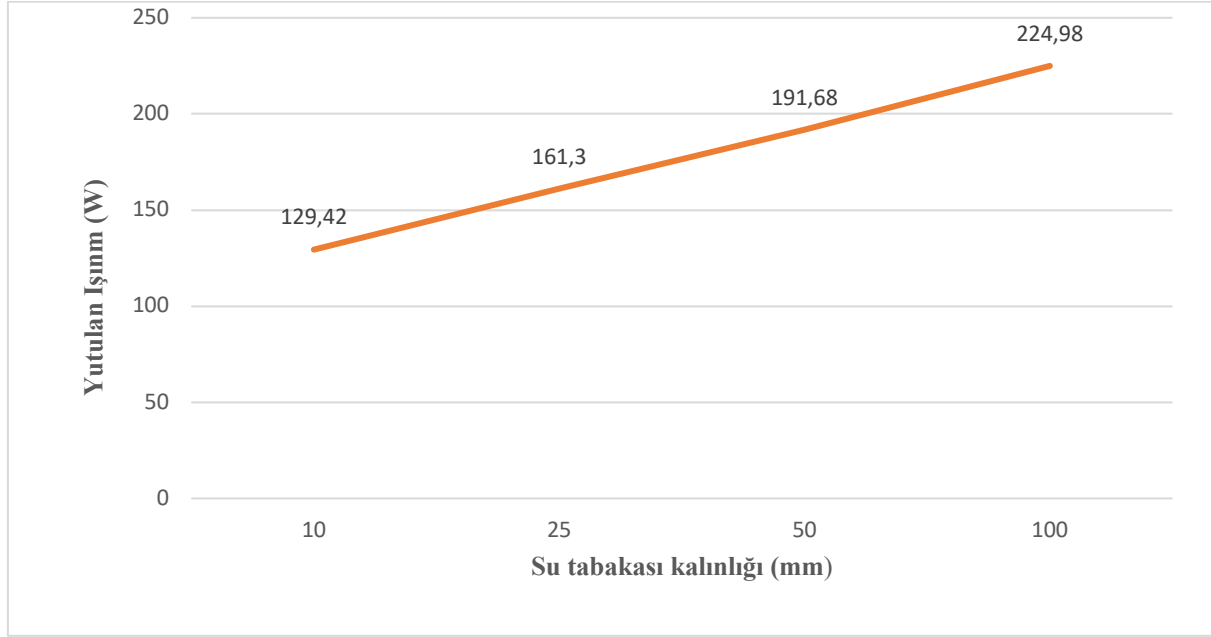
Bu çalışmada, tasarlanan 4 farklı ışınım yutulum ünitesindeki dedektörlerden alınan ışınım değerleri Tablo 2 'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Sistemin farklı konumlarındaki ışınım

	DEDEKTÖR NUMARASI	DEDEKTÖR KONUMU	TOPLAM IŞINIM (W)		DEDEKTÖR NUMARASI	DEDEKTÖR KONUMU	TOPLAM IŞINIM (W)
MODEL 1 10 mm SU TABAKALI YUTULUM ÜNİTESİ	1	-10 mm (üst cam üstü)	799,39	MODEL 3 50 mm SU TABAKALI YUTULUM ÜNİTESİ	1	-10 mm (üst cam üstü)	799,39
	2	0 mm (su tabakası üst bölge)	772,66		2	0 mm (su tabakası üst bölge)	772,2
	3	10 mm (su tabakası alt bölge)	643,24		3	50 mm (su tabakası alt bölge)	580,52
	4	60 mm (PV panel )	620,45		4	100 mm (PV panel )	560,11
MODEL 2 25 mm SU TABAKALI YUTULUM ÜNİTESİ	1	-10 mm (üst cam üstü)	800	MODEL 4 100 mm SU TABAKALI YUTULUM ÜNİTESİ	1	-10 mm (üst cam üstü)	800
	2	0 mm (su tabakası üst bölge)	773		2	0 mm (su tabakası üst bölge)	772,75
	3	25 mm (su tabakası alt bölge)	611,7		3	100 mm (su tabakası alt bölge)	547,77
	4	75 mm (PV panel)	590		4	150 mm (PV panel )	528,39

- Model 1’de su tabakası üst ve altında konumlandırılan 2. ve 3. Dedektörlerde saydırılan ışınım farkı 129.42 W değerindeki ışınım yutulmuş bölgesinde yutulmuş olup, fotovoltaik panel yüzeyine 620 W’lık ışınım düştüğü belirlenmiştir.
- Model 2’de su tabakası üst ve altında konumlandırılan 2. ve 3. Dedektörlerde saydırılan ışınım farkı 161.3 W değerindeki ışınım yutulmuş bölgesinde yutulmuş olup; fotovoltaik panel yüzeyine 590 W ışınım düştüğü belirlenmiştir.
- Model 3’te su tabakası üst ve altında konumlandırılan 2. ve 3. Dedektörlerde saydırılan ışınım farkı 191.69 W değerindeki ışınım yutulmuş bölgesinde yutulmuş olup; fotovoltaik panel yüzeyine 560.11W ışınım düştüğü belirlenmiştir.
- Model 4 ‘te su tabakası üst ve altında konumlandırılan 2. ve 3. Dedektörlerde saydırılan ışınım farkı 224,98 W değerindeki ışınım yutulmuş bölgesinde yutulmuş olup; fotovoltaik panel yüzeyine 528,39 W ışınım düştüğü belirlenmiştir.

Optik analiz sonuçlarından yutulmuş ünitesinde yutulmuş ışınım miktarının tabaka kalınlığına göre değişimi Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. Farklı kalınlıklardaki su tabakalarında yutulmuş ışınım

Farklı su tabakası kalınlığına sahip modeller için panel elektrik üretim verim ve miktarları, panelden atılması gereken ısı miktarları Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Farklı su tabakası kalınlıkları için Panel Verimi, Elektrik ve Isı Üretimi

	Panel Verimi $\eta_{pv}$	Panel’e Ulaşan Işınım (W)	Elektrik Üretimi ( $W_{el}$ )	Isı Üretimi Q (W)
<b>Referans Panel</b>	18	800	144	656
<b>10 mm su tabakalı</b>	16,35	620,45	130,82	489,43
<b>25 mm su tabakalı</b>	15,89	590	127,12	462,88
<b>50 mm su tabakalı</b>	15,34	560,11	122,72	437,39
<b>100 mm su tabakalı</b>	14,6	528,39	116,8	411,59

50 mm su tabakası kalınlıklı yutulmuş ünitesi bulunduran model için akışkan farklı akışkan debilerinde çıkış sıcaklıkları Tablo 7’de verilmiştir.

**Tablo 7.** Farklı Debilerde Isıl Ünite Akışkan Çıkış Sıcaklıkları

<b>Debi (kg/h)</b>	<b>Soğutucu Akışkan Çıkış Sıcaklığı T<sub>çıkış</sub> (°C)</b>
64	34,08
128	29,73
256	27,59

Farklı debi değerleri için ısı kazanımlarının Carnot eşlenik elektrik değerleri sırasıyla 10.35 , 61.75 ve 95.08 W olarak hesaplanmıştır.

50 mm su tabakası kalınlıklı yutulmuş ünitesi bulunduran model için akış debisi 64 kg/h alınarak farklı ışınım değerlerinde yapılan ısı analizler için çıkış sıcaklıkları Tablo 8’de verilmiştir.

**Tablo 8.** Farklı Işınım Altında Isıl Ünite Akışkan Çıkış Sıcaklıkları

<b>Işınım Şiddeti (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Soğutucu Akışkan Çıkış Sıcaklığı T<sub>çıkış</sub> (°C)</b>
800	34,08
1600	42,93
2400	51,89
4000	69,83

Farklı ışınım şiddeti değerleri için ısı kazanımlarının Carnot eşlenik elektrik değerleri sırasıyla 10,35 , 155,54 , 440,41 ve 1223,57 W olarak hesaplanmıştır.

### 3. Sonuçlar

Bu çalışma 4 farklı su katmanı kalınlığındaki ışınım yutulmuş ünitesi içeren modeller karşılaştırıldığında su katmanı kalınlığının artırılması yutulmuş katmanında yutulmuş enerji miktarını artırarak fotovoltaik modülün düzeltilmiş elektrik verimini arttırdığı görülmüştür. Çalışmada su debisinin artışıyla sistemde ortalama sıcaklıkların düşürülmesi aracılığıyla üretilebilecek elektrik enerjisi ve kazanılan ısı Carnot eşdeğeri elektrik miktarlarının arttığı görülmüştür. Yine, yoğunlaştırılmış ışınım altında sistem ortalama sıcaklıklarının artmasıyla beraber kazanılan ısı Carnot eşdeğeri elektrik miktarlarının arttığı da görülmüştür.

Yoğunlaştırılmış ışınım altında fotovoltaik modülle elektrik üretiminin en büyük problemi olan yüksek sıcaklıkları düşürmenin çok katmanlı yüksek verimli ve yüksek maliyetli hücre kullanımına alternatif olarak görece düşük maliyetlerle yutulmuş katmanı sayesinde gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir.

Bu çalışmanın devamında farklı fotovoltaik modül teknolojileri ve farklı yutulmuş ünitesi akışkanları araştırılarak optimum Güneş enerjisi sistemi tasarlanabilir.



## Referanslar

- Bergene, T., ve Lovvik, O.M., (1995). Model Calculations On A Flat-Plate Solar Heat Collector with Integrated Solar Cells, *Solar Energy*, 55(6), 453-462. doi:10.1016/0038-092X(95)00072-Y.
- Deng, R., He, Y., Qin, Y., Chen, Q., & Chen, L. (2012). Measuring pure water absorption coefficient in the near-infrared spectrum(900--2500 nm). *Yaogan Xuebao- Journal of Remote Sensing*, 16(1), 192-206.
- Duffie JA, Beckman WA, (1991). *Solar Energy of Thermal Process*, 2nd Edition. New York, John Wiley & Sons,
- Gang Wang, Fasi Wang, Fan Shen, Zeshao Chen, Peng Hu (2019). Novel design and thermodynamic analysis of a solar concentration PV and thermal combined system based on compact linear Fresnel reflector. *Energy* 180,133-148. doi: 10.1016/j.energy.2019.05.082.
- Hatwaambo, S, Hakansson, H., Nilsson, J. ve Karlsson, B. (2008). Angular characterization of low concentrating PV– CPC using low-cost reflectors. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 92: 1347– 1351. doi:10.1016/j.solmat.2008.05.008
- Ji, Jie, et al. ( 2007). A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation. *Applied Energy*, 84.2: 222-237. doi:10.1016/j.apenergy.2006.04.009
- Smith, M. K., Selbak, H., Wamser, C. C., Day, N. U., Krieske, M., Sailor, D. J., & Rosenstiel, T. N. (2014). Water cooling method to improve the performance of field-mounted, insulated, and concentrating photovoltaic modules. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, 136(3), [034503]. doi:10.1115/1.4026466
- Tripathi R., Saini, V., Tiwari, G.N. ve Al-Helal, I.M. (2018). Electrical and thermal energy assessment of series connected N partially covered photovoltaic thermal (PVT)-compound parabolic concentrator (CPC) collector for different solar cell materials. *Applied Thermal Engineering*, 128: 1611–1623. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.09.119
- Zhao Jiafei, Song Yongchen, Lam, Wei-Haur, Liu Weiguo, Liu Yu, Zhang Yi, & Wang DaYong (2011). Solar radiation transfer and performance analysis of an optimum photovoltaic/thermal system. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 1343-1353. doi:101016/j.enconman201009032