



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Hava soğutmalı fotovoltaik panellerde kanatçık tipinin soğutmaya etkisinin teorik olarak incelenmesi

## *Theoretical investigation of the effect of fin type on cooling in air cooled photovoltaic panels*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Kemal BİLEN<sup>1</sup>, Bilal IŞIK<sup>2</sup>, Sultan GEZER<sup>3</sup>, Furkan KIYIK<sup>4</sup>

*ORCID*<sup>1</sup>: 0000-0003-1775-7977

*ORCID*<sup>2</sup>: 0000-0003-4369-2206

*ORCID*<sup>3</sup>: 0000-0001-8886-4337

*ORCID*<sup>4</sup>: 0000-0003-0844-897X

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Bilen K., Işık B., Gezer S. ve Kıyık F., “Hava soğutmalı fotovoltaik panellerde kanatçık tipinin soğutmaya etkisinin teorik olarak incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 25(2): 711-722, (2022).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.747243

# Hava Soğutmalı Fotovoltaik Panellerde Kanatçık Tipinin Soğutmaya Etkisinin Teorik Olarak İncelenmesi

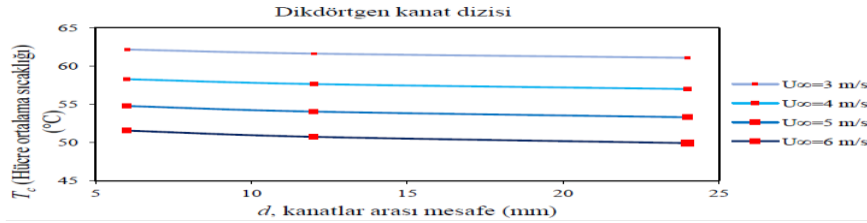
## Theoretical Investigation of the Effect of Fin Type on Cooling in Air Cooled Photovoltaic Panels

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Dikdörtgen, üçgen ve parabolik olmak üzere üç farklı kanatçık tipi için sıcaklık dağılımı bulunmuş ve ısı geçişi hesaplanmıştır. / Temperature distribution is determined and heat transfer is calculated for three different fin types, rectangular, triangular, and parabolic.
- ❖ Soğutma sayesinde fotovoltaik (PV) panelin elektriksel verimindeki olası artış miktarı literatürdeki çalışmalarla kıyaslama yapılarak ortaya konmuştur. / The possible increase in the electrical efficiency of the photovoltaic (PV) panel by means of cooling has been revealed by making a comparison with the studies in the literature.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Alt yüzeyine dikdörtgen, üçgen ve parabolik geometrilerde kanatçıklar yerleştirilmiş PV panellerin hücre sıcaklıklarındaki düşüş ve buna bağlı olarak en etkili soğutmaya yapan kanatçık tespit edilmiştir. / Decrease in cell temperature was determined for PV panels which rectangular, triangular, and parabolic fins were placed on the bottom surfaces and the fin that performs the most effective cooling was determined by using this decreasing.



Şekil.14 Farklı akış hızlarındaki ortalama hücre sıcaklığının, kanatlar arası mesafe ile değişimi. / Figure.14 The variation of the average cell temperature at different flow rates with the distance between the fins.

### Amaç (Aim)

Bu çalışmanın amacı; alt yüzeyine çeşitli geometrilerde kanatçıklar yerleştirilmiş bir PV panelin ortalama hücre sıcaklığındaki düşüşü ve buna bağlı olarak elektriksel verimindeki artışı hesaplamaktır. / The aim of this study is to calculate decrease in average cell temperature and increase in electrical efficiency of the PV panel with fins of various geometries on the bottom surface related to this decrease.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Çalışmada; kanatçıklardaki sıcaklık dağılımı ve kanatçıklardan geçen ısı miktarı analitik ve nümerik olarak bulunmuştur. / In the study, temperature distribution at the fins and the amount of heat passing through the fins were found analytically and numerically.

### Özgünlük (Originality)

Bu çalışmada; PV panelin ortalama hücre sıcaklıkları dikdörtgen, üçgen ve parabolik yapıda olmak üzere üç farklı kanatçık tipi için incelenmiştir. / In this study, average cell temperatures of the PV panel were examined for three different fin types, rectangular, triangular, and parabolic.

### Bulgular (Findings)

Çalışmada; alt yüzeyine kanatlar yerleştirilmiş PV panelin ortalama hücre sıcaklıklarının, kanatsız PV panele göre, bazı parametrelere bağlı olarak 8 °C ila 26 °C daha düşük olduğu tespit edilmiştir. / In the study, it has been determined that the average cell temperatures of the PV panel with fins placed on the bottom surface are 8 °C to 26 °C lower than the PV panel without fins, depending on some parameters.

### Sonuç (Conclusion)

Sonuç olarak, en etkili ısı geçişinin dikdörtgen geometrideki kanat ile gerçekleştiği ve PV panelin elektriksel veriminin %6 ila %11.5 arasında arttığı tespit edilmiştir. / As a result, it has been determined that the most effective heat transfer occurs with the rectangular fin and the electrical efficiency of the PV panel increases between 6% and 11.5%.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları, çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin, etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Hava Soğutmalı Fotovoltaik Panellerde Kanatçık Tipinin Soğutmaya Etkisinin Teorik Olarak İncelenmesi

*Araştırma Makalesi/Research Article*

**Kemal BİLEN, Bilal IŞIK\*, Sultan GEZER, Furkan KIYIK**

Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Türkiye  
(Geliş/Received: 02.06.2020 ; Kabul/Accepted: 08.01.2021 ; Erken Görünüm/Early View : 09.02.2021)

## ÖZ

Günümüzde güneş enerjisinden farklı alanlarda, farklı sistemlerle, etkin bir şekilde yararlanılmaktadır. Güneş enerjisinden yararlanmanın etkili yollarından biri de fotovoltaik güneş panelleridir. Güneşten gelen enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bu sistemlerin kullanımı hızla yaygınlaşmaktadır. Fotovoltaik panellere yönelik bu yoğun ilgi beraberinde, bu sistemler üzerine araştırma ve geliştirme çalışmalarını getirmektedir. Yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu güneş panellerinin verimini yükseltmeye yöneliktir. Fotovoltaik panellerin verimi; yüzey kirliliği, panelin güneşe göre konumu, gölgelenme, güneş hücrelerinin tipi ve sıcaklığı gibi faktörlerden etkilenmektedir. Güneş paneli hücrelerinin sıcaklığının artması, panelin elektrik üretimini azaltmaktadır. Bu sebeple, daha yüksek bir verim için güneş panellerinin soğutulması gerekir ve bu amaç için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu çalışmada, havayla soğutulan ve alt yüzeyine farklı geometrilerde kanatçık dizileri uygulanmış fotovoltaik panellerdeki sıcaklık dağılımı teorik olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, seçilen üç farklı kanatçık tipi için kanatçıklardaki sıcaklık dağılımı elde edilmiş ve bu denklemler analitik ve nümerik olarak çözülmüştür. Elde edilen sonuçlardan hareketle bu kanatçık tipleri; toplam ısı geçişi miktarı, kanat verimi, kanat etkenliği ve toplam yüzey verimi gibi parametreler bakımından karşılaştırılarak en uygun kanatçık tipi belirlenmeye çalışılmıştır. Özetle bu çalışmada, gerçekleşen soğutma miktarı ve bu soğutmanın, panelin ortalama hücre sıcaklığına etkisi teorik olarak analiz edilmiştir. Çalışmada; alt yüzeyine kanatlar yerleştirilmiş fotovoltaik (PV) panelin ortalama hücre sıcaklıklarının, kanatsız PV panele göre, hava hızı, kanatçıklar arası boşluk ve kanatçık tipi gibi parametrelere bağlı olarak 8 °C ila 26 °C daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Hücre ortalama sıcaklıklarındaki bu düşüş, literatürdeki deneysel verilere göre, beraberinde yaklaşık %6 ila %11.5 arasında bir elektriksel verim artışı sağlayacaktır. Çalışmada ayrıca; dikdörtgen kanatların, üçgen kanatlardan %4.1 ila %6.7, parabolik kanatlardan ise %13.2 ila %15.3 daha fazla ısı geçişi sağladığı tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Güneş enerjisi, fotovoltaik, hava soğutmalı, kanat dizisi, kanat verimi.

## Theoretical Investigation of the Effect of Fin Type on Cooling in Air Cooled Photovoltaic Panels

### ABSTRACT

Nowadays, solar energy is effectively utilized in different areas with different systems. One of the effective ways to benefit solar energy is photovoltaic solar panels. The usage of these systems, which convert the solar energy into electrical energy, is rapidly widespread. This intense interest aimed at photovoltaic panels brings with it studies of research and development on these systems. The great majority of the studies done is oriented to increase the efficiency of solar panels. The efficiency of photovoltaic panel is affected by factors such as surface pollution, location of the panel relative to the sun, shading and the type and temperature of solar panel cells. Increasing the temperature of solar cells reduces the electricity production of the panel. For this reason, solar panels need to be cooled for a higher efficiency and many methods have been developed for this purpose. In this study, efficiency of photovoltaic panels, which are air-cooled and with finned arrays of different geometries are applied to the bottom surface, are theoretically investigated. Within this scope, temperature distribution in the fins were obtained for three different fin types and these equations were solved analytically and numerically. Based on the results obtained, these fin types were compared in terms of parameters such as total heat transfer rate, fin efficiency, fin effectiveness, and total surface efficiency and the most appropriate fin type was tried to be determined. In summary, in this study, the amount of cooling obtained and the contribution of this cooling to the average temperature of the solar panel cells are theoretically analyzed. In the study, it has been determined that the average cell temperatures of the photovoltaic (PV) panel with fins placed on the bottom surface are 8 °C to 26 °C lower than the PV panel without fins, depending on parameters such as air velocity, fin spacing, and fin type. This decrease in cell average temperatures will result in an increase in electrical efficiency of about 6% to 11.5%, according to experimental data in the literature. Also in the study, it has been determined that rectangular fins provide 4.1% to 6.7% more heat transfer than triangular fins and 13.2% to 15.3% more than parabolic fins.

**Keywords:** Solar energy, photovoltaics, air-cooled, fin array, fin efficiency.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsanların varoluşundan beri en temel ve en önemli ihtiyaçlarından biri de enerji olmuştur. Bu enerji ihtiyacı,

insan nüfusunun çoğalması ve teknolojinin gelişmesine paralel olarak her geçen gün artmaktadır. Günümüzde bütün ülkeler enerji ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla hem fosil hem de yenilenebilir enerji kaynaklarına çok büyük paralar harcamakta, çok büyük yatırımlar

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
E-posta: isik.bilal@outlook.com

yapmaktadır. Bu bağlamda, dünya genelinde enerji üretilebilecek hemen her sistem üzerine araştırma geliştirme (Ar-Ge) faaliyetleri yürütülmektedir.

Enerji üretilebilecek kaynaklar temelde, fosil enerji kaynakları ve yenilenebilir enerji kaynakları olmak üzere ikiye ayrılabilir. Fosil enerji kaynaklarını kullanan enerji dönüştürücü sistemler günümüzde çok yaygındır ve hemen her alanda kullanılmaktadır. Ancak yapılan araştırmalara göre dünyadaki fosil kaynaklar hızla tükenmektedir. Bu da göstermektedir ki çok uzak olmayan bir gelecekte fosil yakıtlarla enerji üreten sistemler kullanılamaz hale gelecektir. Bu durum, yenilenebilir kaynaklardan enerji üreten sistemleri geliştirmeyi ve verimlerini artırmayı zorunlu hale getirmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının birçok çeşidi bulunmaktadır. Bu enerji türünün en önemlilerinden biri şüphesiz güneş enerjisidir. Dünyadaki yaşamın devam edebilmesi güneşe bağlıdır. Bu açıdan bakıldığında güneşin insanlar için sınırsız ve vazgeçilmez bir enerji kaynağı olduğunu söylemek yanlış olmaz.

Günlük hayatta güneş enerjisinden farklı alanlarda yararlanılmaktadır. Evlerin elektrik enerjisinin üretimi, sıcak su elde edilmesi ve aydınlatma, güneş enerjisinin kullanıldığı birkaç temel örnek olarak gösterilebilir. Günümüzde, güneş enerjisini, en fazla kullanılan enerji formu olan elektrik enerjisine dönüştüren birçok sistem vardır. Bu bağlamda, güneş enerjisinden yararlanmanın en önemli sistemlerinden biri fotovoltaik (PV) güneş panelleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Güneş panelleri, güneşten alınan enerjinin elektrik enerjisine çevrilmesinde önemli bir yere sahiptir. Dikkatli bir şekilde gözlemlendiğinde, gün geçtikçe güneş panellerinin kullanımının hızla arttığı görülebilir. Bu paneller bireysel olarak evlerde günlük enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılabilirdiği gibi, güneş tarlaları kurularak yüksek miktarda enerji elde edilmesinde de kullanılabilir. PV panellerin kullanımına olan ilginin giderek artması, güneş panelleri üzerine birçok çalışmayı beraberinde getirmiştir. Bu çalışmalarda amaç, güneş enerjisinden maksimum faydayı elde ederek bu enerjiden etkin bir şekilde yararlanmaktır.

Güneş panelleri üzerine yapılan çalışmalarda elde edilen verimin, genel olarak %20-25 civarında olduğu görülmektedir [1]. PV güneş panellerinin kullanımına olan ilginin artması ve verimlerinin artırılabilir potansiyele sahip oluşu, bilim insanlarını bu alanda çalışmaya yönlendirmiştir.

Grubisic-Cabo vd. [2] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada, alt yüzeyine alüminyum kanatçıklar sabitlenmiş ve pasif soğumayla soğutulan PV panelin farklı mevsimsel dönemlerdeki panel hücre sıcaklıkları incelenmiştir. Özellikle yaz ve sonbahar dönemlerinde yapılan deneylerde, alt yüzeyine değişik konfigürasyonlarda kanatçık ilave edilen panelin hücre sıcaklıklarında düşüş olduğu gözlenmiştir. Bu sıcaklık azalışının, PV panelin elektriksel verimini artırdığı tespit edilmiştir.

Özakin ve Kaya [3] tarafından yapılan teorik bir çalışmada, alt yüzeyine silindirik geometriye sahip kanatçıklar eklenmiş hava soğutmalı PV panellerin ısı analizleri ANSYS Fluent programı yardımıyla yapılmıştır. Çalışmada, farklı rüzgâr hızları için analizler yapılmış ve panelin hücre sıcaklıklarının 10 ila 15 °C arasında azaldığı tespit edilmiştir. Bu sıcaklık düşüşünün panellerde ortalama %20 civarında bir verimlilik artışı sağladığı ortaya konmuştur.

Elbreki vd. [4] yapmış oldukları deneysel bir çalışmada, PV panelin alt yüzeyine dikdörtgen kanatçıklar eklenmiş ve panel pasif soğumaya bırakılmıştır. Böylece, panel hücre sıcaklıklarının ortam sıcaklığına göre 8 ila 10 °C daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmada ayrıca, yaşam döngüsü maliyet analizi de yapılarak panele ilave edilen alüminyum kanatçıkların, elektriksel verimi artırarak panelin, 4-5 yıl gibi -PV panellerin kullanım ömrüne kıyasla kısa sayılabilecek- bir sürede kendi maliyetini karşıladığı tespit edilmiştir.

Hernandez-Perez vd. [5] tarafından yapılan teorik bir çalışmada, bir deney düzeneğinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) modeli oluşturulmuştur. Fotovoltaik bir panelin alt yüzeyine yerleştirilen alüminyum kanatçıkların aralıkları değiştirilerek oluşturulan çeşitli konfigürasyonlar modellenmiş ve pasif soğuma şartları altında analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, ilgili deneysel çalışmanın sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve sonuçların birbirlerine yakın olduğu gösterilmiştir. Bu simülasyonlarda, panel hücre sıcaklıklarının ortalama 7 °C azaldığı görülmüştür.

Bayrak vd. [6] yaptıkları deneysel bir çalışmada, PV panellerde yaygın olarak kullanılan soğutma tekniklerini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. İncelenen bu soğutma tekniklerinden biri de alt yüzeyine kanatçıklar eklenmiş ve pasif soğumaya bırakılmış bir PV panel sistemidir. Eklenen bu kanatçıklar sayesinde PV panel hücre sıcaklıkları azalmış, buna bağlı olarak da PV panelin elektriksel veriminde %20'ye varan iyileşme sağlanmıştır.

Literatürdeki güncel çalışmalar incelendiğinde ağırlıklı olarak panelin alt yüzeyine dikdörtgen kesitli kanatçıkların eklendiği ve panele havayla pasif soğutma yapıldığı görülmüştür. Pasif soğutma yapıldığında bile panelin elektriksel veriminde önemli artışlar olduğu tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışmada ise panellerin, akışkan olarak hava kullanılarak zorlanmış ısı taşınımı yoluyla soğutulması incelenmiştir. Bu çalışmada ayrıca, dikdörtgen kesitli kanatçıklara alternatif olarak üçgen ve parabolik kanatçıkların da panelin soğutulmasına etkisinin literatüre kazandırılması hedeflenmiştir.

## 2. FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PANELLERİ (PHOTOVOLTAIC SOLAR PANELS)

PV paneller, güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren ve çok yaygın olarak kullanılan sistemlerden biridir. Farklı alanlarda ve farklı amaçlar için kullanılan birçok PV panel sistemi bulunmaktadır. Bu geniş ve farklı kullanım alanları sebebiyle pek çok farklı panel çeşidi

üretimiştir. Genel olarak panel çeşitleri şu başlıklar altında toplanabilir [7]:

- Monokristal güneş paneli
- Polikristal güneş paneli
- İnce film güneş paneli
- Esnek güneş paneli
- Saydam güneş paneli

Güneş paneli (güneş pili) tipleri arasında en verimli güneş paneli monokristal panellerdir. Bu tip güneş paneli küçük alanlarda daha fazla enerji üretir. Bununla birlikte, monokristal enerji panellerinin fiyatı diğer güneş panellerinden daha yüksektir. Monokristal güneş panellerinin verimi yaklaşık %24'tür. Bu oran piyasadaki diğer güneş panellerinden çok daha yüksektir. Ancak birim güç başına fiyat, diğer enerji panellerinin neredeyse iki katıdır [7]. Bu güneş panelleri daha uzun kullanım ve daha fazla elektrik üretim ömrüne sahiptir. Ek olarak, monokristal güneş panelleri sıcak iklimlerde daha verimli çalışabilir.

Polikristal güneş paneli pazarda en çok kullanılan üründür. Maliyet-verim oranı dengelidir ve en ucuz güneş panellerinden biridir. Birçok güneş enerjisi santrali, polikristal güneş panelleri ile inşa edilmiştir. Pazarın yaklaşık %68'i polikristal güneş pilleri kullanmaktadır. Monokristal güneş panellerine göre havadaki sıcaklık değişimlerinden daha fazla etkilenirler. Bu güneş pillerinin verimi %15 civarındadır [7].

İnce film güneş paneli, elektrik üretim pazarında diğer türdeki panellere göre en küçük paya sahiptir. İnce film güneş hücreleri çok fazla tercih edilmez. Bu güneş paneli tipinin tercih edilmemesinin ana nedeni düşük verime sahip olmasıdır. İnce film güneş pilleri çok fazla yer kaplar ancak fazla yer kaplamasına rağmen, alan-verim ilişkisi açısından çok düşük bir performansa sahiptir. Bu güneş paneli tipinin verimi yaklaşık %7 civarındadır. Sıcaklık değişimlerine ve gölgelenmelere karşı aşırı duyarlı değildir.

Esnek güneş panelleri, kullanım olanakları açısından avantajlı bir panel çeşididir. Bu güneş panelleri oldukça esnektir ve kırılmaya karşı dayanıklıdır. Bu tür güneş hücrelerinin yapısı hem monokristal hem de polikristal olabilir. Bu durum, aynı zamanda enerji panellerinin verimini de çeşitlendirir. Esnek güneş panelleri çok hafiftir, çünkü bu panellerde alüminyum çerçeve ve temperli cam yoktur. Kubbe tarzı eğimli çatılar için idealdir. Çatının düz olması gerekmez.

Saydam güneş paneli diğer güneş panellerine oranla çok daha verimlidir. Bu güneş panellerinin kimyasal yapısında; hidrojen, karbon, oksijen ve üretici tarafından formülü verilmeyen bir bileşik kullanılmaktadır. Bu saydam solar panel, herhangi bir cam yüzeye sprej gibi sıkılarak yüzeyin tamamen bu sıvıyla kaplanması sağlanır. Daha sonra bu yüzey elektrik üretmeye başlar [7]. Bu panel çeşidi, gölgelenme durumundan da fazla etkilenmemektedir.

### 3. FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PANELLERİNİN VERİMİ (EFFICIENCY OF PHOTOVOLTAIC SOLAR PANELS)

PV hücreler, güneş ışığının bir kısmını soğurarak elektrik enerjisine çevirir. PV panellerin elektrik üretim verimini etkileyen bazı parametreler vardır. Bu parametrelerin en önemlileri; yüzey kirliliği, panelin güneşe göre konumu, gölgelenme, güneş hücrelerinin tipi ve sıcaklıktır.

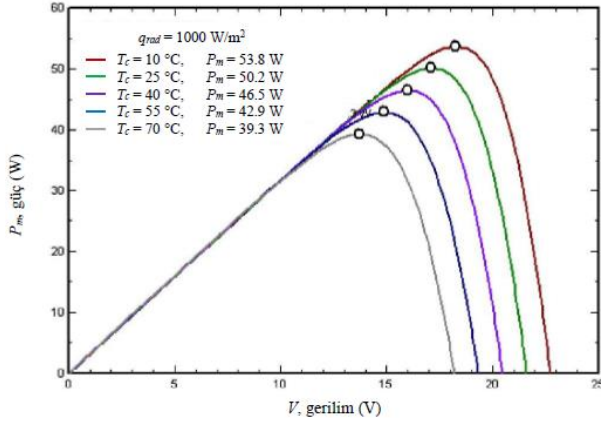
Yaygın olarak karşılaşılan problemlerden biri olan yüzey kirliliği sebebiyle hücreye iletilen güneş ışığı azalır. Bu nedenle emme oranı azalır ve elektrik üretiminde kayıplar meydana gelir. Bu kayıplar, doğal olarak panelin verimini düşürür. Panel yüzeyindeki kirlenme; yağış, toz gibi çevresel faktörler nedeniyle meydana gelir [8]. Bu sebeple, panellerin veriminin düşmemesi ve mümkün olan en fazla gücün elde edilebilmesi için düzenli olarak temizlenmesi gerekir.

Verimi etkileyen bir diğer etken ise panelin güneşe göre konumudur. PV paneller, güneşe doğru konumlandırıldıkları zaman maksimum verim elde edilebilir. Paneller hareketli bir yapı üzerine kurulmuşsa, güneş ışığını izleyebilir ve günün herhangi bir saatinde en yüksek verim alınabilir.

Güneş panelinin gölgelenme durumu ve süresi verim üzerinde etkisi olan bir diğer önemli faktördür. Güneş hücreleri üzerindeki küçük bir gölge, verim üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bir hücrede gölgelenme olması, diğer serideki hücrelerin performansını da etkiler. Gölgeye neden olan faktörler; genel olarak bulutlar, dağlar, ormanlık alanlar, ağaçlar, binalar ve buna benzer dış etkenlerdir. Bu dış etkenlere ek olarak, dizilim şekilleri nedeniyle paneller de birbirleri üzerine gölge yapabilir.

Panellerin güneş hücresi tipi de verim üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Panel yüzeyine gelen güneş ışığının bir kısmı, hücreler tarafından emilmeden yüzeyden yansıtılır. Hücre tipi, yansıma üzerinde etkilidir. Panel yüzeyinden hücreye iletilen güneş ışığının emilimini artırmak için farklı güneş hücre tipleri kullanılır. Günümüzde en çok kullanılan güneş pilleri; kristal silikon, bakır indiyum diselenide, kadmiyum telluride, galyum arsenit ve amorf silikondur [8].

Güneş panellerinin verimini etkileyen en önemli etken olan güneş hücrelerinin aşırı ısınması panellerin verimini doğrudan etkilemektedir. Güneş hücrelerinin aşırı ısınması, performans kaybına neden olur. Ortam sıcaklığı arttığında, buna bağlı olarak hücre sıcaklığı da artar. Bu nedenle sistemde kayıplar meydana gelir. Şekil 1'de görüldüğü gibi, güneş hücresinin ortalama sıcaklığının artması panelin verimini önemli ölçüde düşürmektedir.



**Şekil 1.** Farklı hücre sıcaklıklarında PV panelden elde edilen güç-gerilim karakteristiği (Power-voltage characteristic obtained from PV panel at different cell temperatures) [9].

Bu kayıpları önlemek için çeşitli soğutma sistemleri kullanılmaktadır. Bu amaçla, panelleri yerleştirmeden önce, bölgenin yıl içindeki ortalama sıcaklık değerleri bilinmeli ve panele en uygun soğutma metodu belirlenmelidir.

#### 4. FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PANELLERİNİN SOĞUTULMASI (COOLING OF PHOTOVOLTAIC SOLAR PANELS)

Panel verimini düşüren birçok etken vardır. Bu etkenler içerisinde güneş hücrelerinin sıcaklığının artışı en çok çözüm yolu aranan problemlerden biridir. Günümüzde güneş hücrelerini soğutmak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Uygulanan soğutma yöntemleri Çizelge 1’de görüldüğü gibi temelde iki gruba ayrılabilir.

**Çizelge 1.** PV panellerin soğutma yöntemleri (PV panels cooling methods).

Soğutma yöntemleri	
Pasif soğutma	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Havayla pasif soğutma</li> <li>- Suyla pasif soğutma</li> <li>- Faz değiştiren malzemelerle soğutma</li> <li>- Isı borusuyla soğutma</li> </ul>
Aktif soğutma	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Havayla aktif soğutma</li> <li>- Suyla aktif soğutma</li> </ul>

Pasif soğutma yöntemlerinde soğutma işlemi için enerji harcanmaz. Soğutma, doğal yoldan gerçekleşir. Pasif soğutma yöntemleri arasında en etkili olanı suyla pasif soğutmadır. En yüksek ısı geçişi bu yöntemle sağlanır [10].

Havayla pasif soğutma yönteminde PV güneş paneli doğal ısı taşınım yöntemi ile soğutulur. Panelin alt yüzeyindeki kanatçıklar genellikle ısı geçişini artırmak için kullanılır. Kanatçıklar, yüksek ısı iletkenliğe sahip malzemelerden yapılır. Soğutma için enerji harcanmaz,

ancak soğutma miktarı diğer yöntemlerden daha düşüktür.

Su ile pasif soğutma ise hava ile pasif soğutmadan daha etkili bir yöntemdir. Bu yöntemde, termosifon etkisi meydana gelir. Termosifon olgusu, soğuk suyun ılık sudan daha yüksek bir yoğunluğa sahip olması nedeniyle alt seviyede birikmesi prensibine dayanır. Bu nedenle, kollektör her zaman su deposunun altına monte edilir. Böylece, depodan gelen soğuk su, bir boru yardımıyla kollektöre ulaşır. Kollektör suyu ısıttığında, su tekrar yükselir ve kollektörün üst ucundaki tanka ulaşır [10].

Faz değiştiren malzemeler (PCM) katıdan sıvıya faz değiştirerek ısı enerjisi depolar, çünkü erime veya donmadan kaynaklanan gizli ısı, özgül ısı ile ilgili olan duyulur ısıdan en az 1-2 mertebe daha büyüktür. Bu soğutma çeşidi özel bir soğutma türüdür. Bu, tam anlamıyla soğutma olarak görülmemesine rağmen, ısıyı muhafaza etmeyi sağlar.

Isı borusu, sonsuz bir döngüde buharlaşarak ve yoğunlaşarak ısıyı taşıyan ve sıvı bir soğutucu akışkan ile doldurulmuş içi boş metal bir borudur. Isı borusunun alt ucu ısındığında, içindeki soğutucu akışkan buharlaşmaya başlar ve ısıyı soğurur. Soğutucu akışkan ve taşıdığı ısı yükü, ısı borusu içinde taşınır. Düşük moleküler yoğunluk, buharlaşmış soğutma sıvısını, ısı borusunun soğuk ucuna doğru yukarı hareket etmeye zorlar. Soğutucu akışkan daha sonra gizli ısıyı salıvererek tekrar sıvı hale geçer yani yoğunlaşır. Yoğuşma hızı, buhar ve ısı borusu yüzeyi arasında artan delta sıcaklıkları ile arttığından, gaz halindeki soğutucu otomatik olarak ısı borusu içindeki en soğuk noktaya doğru akmaktadır. Soğutucu yoğunlaştığında ve moleküler yoğunluğu bir kez daha arttığından, yerçekimi kuvvetleri soğutucu maddeyi ısı borusunun alt ucuna doğru çeker [11].

Aktif soğutmada ise soğutma işlemi için enerji harcanır. Geçen ısı miktarı, pasif soğutma yöntemlerine göre oldukça fazladır. Zorlanmış taşınımın, hava veya su yardımıyla sağlandığı iki tipi vardır.

Havayla zorlanmış taşınımında hava, bir fan vasıtasıyla panelin alt yüzeyine dağıtılır. Fanın çalışması için enerji harcanır ve bu enerji panelden karşılanır. Bu yöntemde göz önünde bulundurulması gereken en önemli konulardan biri, fanı çalıştırmak için tüketilen enerji miktarının kabul edilebilir seviyede olması gerektiğidir.

Suyla zorlanmış taşınımında, PV paneli, su kullanılarak soğutulur. Genellikle, panelin alt yüzeyinde suyun geçişi için oluklu bir plaka vardır. Bu kanallarda suyun dolaşımı bir pompa vasıtasıyla sağlanır. Pompa, bu işlem için enerji harcar.

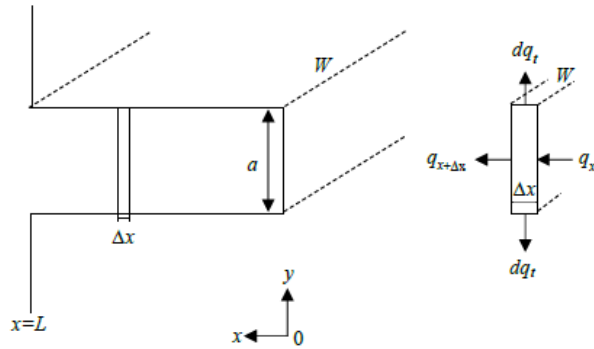
#### 5. TEORİK ANALİZ (THEORETICAL ANALYSIS)

Bu çalışmada; alt yüzeyine çeşitli geometrilerde kanatçıklar monte edilmiş ve fan kullanılarak zorlanmış taşınım ile soğutulan güneş panellerindeki sıcaklık dağılımı teorik olarak incelenmiştir. Teorik analizde, analitik ve nümerik olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmıştır. Nümerik çözümde Runge-Kutta metodu

[12] tercih edilmiştir. Kanatçıkların geometrisi; Şekil 2’de gösterildiği gibi dikdörtgen, Şekil 3’de gösterildiği gibi üçgen ve Şekil 4’de gösterildiği gibi parabolik olarak seçilmiştir. Bu kanatçık tiplerinde sıcaklık dağılımını veren denklemler sırasıyla elde edilmiştir. Denklemlerin elde edilmesinde, enerjinin korunumu yasası kullanılmıştır. Sıcaklık dağılımını veren denklemlerin karşılaştırılabilmesi için bu denklemler ve sınır şartları boyutsuzlaştırılmıştır. Kanatçıklardaki sıcaklık dağılımı bulunduktan sonra ısı geçiş miktarı tespit edilmiştir.

Bu diferansiyel denklemler elde edilirken şu kabuller yapılmıştır: Sürekli rejimde ısı geçişi, bir boyutlu ısı geçişi (-x yönünde, yani kanat içerisinde y yönündeki sıcaklık gradiyeni ihmal edilmiştir), sabit çevre koşulları, sabit termofiziksel özellikler, kanat dip sıcaklığı sabit, kanat ucunda ideal yalıtım. Ayrıca, kanatların alın kısımlarından olan ısı geçişi ihmal edilmiştir.

### Dikdörtgen kesitli kanat:



Şekil 2. Dikdörtgen kesitli kanadın genel görünümü (General view of the rectangular fin).

Bu kabuller altında, enerji denge metodu kullanılarak sıcaklık dağılımını, ısı geçişini ve kanat verimini veren denklemler, kaynaklardan [13] yararlanılarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

$$\dot{E}_{giren} + \dot{E}_{üretilen} = \dot{E}_{çıkan} + \dot{E}_{depolanan} \quad (1)$$

$$q_x = q_{x+\Delta x} + dq_t \quad (2)$$

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{hP}{kA_c} (T - T_\infty) = 0 \quad (3)$$

$$m = \sqrt{\frac{hP}{kA_c}}, \quad \bar{x} = \frac{x}{L}, \quad \theta = \frac{T - T_\infty}{T_b - T_\infty}, \quad dx = L d\bar{x}$$

$$dT = (T_b - T_\infty) d\theta, \quad \frac{dT}{dx} = \frac{T_b - T_\infty}{L} \frac{d\theta}{d\bar{x}} \quad (4)$$

Sınır koşulları;

$$i) \left. \frac{d\theta(\bar{x})}{d\bar{x}} \right|_{\bar{x}=0} = 0 \Rightarrow c_1 mL - c_2 mL = 0 \Rightarrow c_1 = c_2 \quad (5)$$

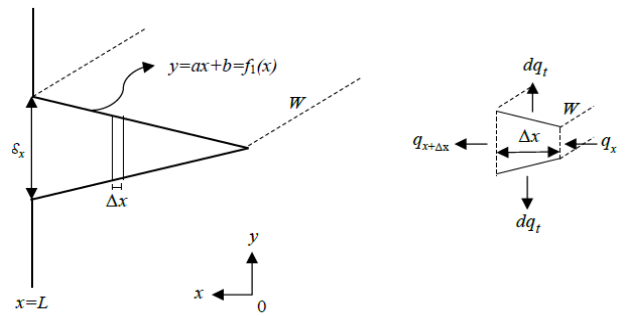
$$ii) \theta(\bar{x})|_{\bar{x}=1} = 1 \Rightarrow c_1 e^{mL} + c_2 e^{-mL} = 1 \Rightarrow c_2 (e^{mL} + e^{-mL}) = 1 \quad (6)$$

$$\theta(\bar{x}) = \frac{1}{2 \cosh(mL)} (e^{mL\bar{x}} + e^{-mL\bar{x}}) \quad (7)$$

$$q_k = -kA_c \left. \frac{d\theta(\bar{x})}{d\bar{x}} \right|_{\bar{x}=1} = kA_c m \theta_b \tanh(mL) \quad (8)$$

$$\eta_k = \frac{q_k}{q_{maksimum}} = \frac{kA_c m \theta_b \tanh(mL)}{hA_f \theta_b} = \frac{\tanh(mL)}{mL} \quad (9)$$

### Üçgen kanat:



Şekil 3. Üçgen kanadın genel görünümü (General view of the triangle fin).

$$x \frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{dT}{dx} - m^2 L (T - T_\infty) = 0 \quad (10)$$

$$m = \left( \frac{2h}{\delta k} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

Sınır koşulları;

$$i) \left. \frac{d\theta(\bar{x})}{d\bar{x}} \right|_{\bar{x}=0} = 0 \Rightarrow$$

$$C_1 2mL \frac{1}{2\sqrt{\bar{x}}} I_1(2mL\sqrt{\bar{x}}) - C_2 2mL \frac{1}{2\sqrt{\bar{x}}} K_1(2mL\sqrt{\bar{x}}) = 0 \quad (12)$$

$$K_1(0) = \infty \Rightarrow C_2 \text{ sıfır olmalı. } C_2 = 0 \quad (13)$$

$$ii) \theta(\bar{x})|_{\bar{x}=1} = 1, \quad C_1 I_0(2mL) + C_2 K_0(2mL) = 1 \Rightarrow$$

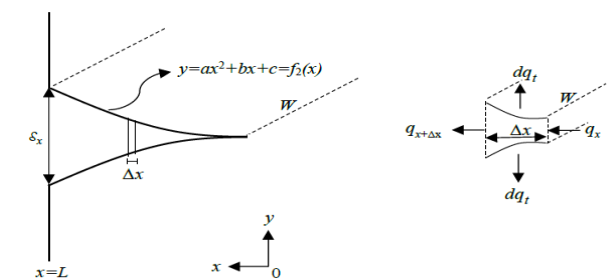
$$C_1 = \frac{1}{I_0(2mL)} \quad (14)$$

$$\theta(\bar{x}) = \frac{I_0(2mL\sqrt{\bar{x}})}{I_0(2mL)} \quad (15)$$

$$q_k = kA_c (T_b - T_\infty) m \left. \frac{I_1(2mL\sqrt{\bar{x}})}{\sqrt{\bar{x}} I_0(2mL)} \right|_{\bar{x}=1} = kA_c (T_b - T_\infty) m \frac{I_1(2mL)}{I_0(2mL)} \quad (16)$$

$$\eta_k = \frac{q_k}{q_{maksimum}} = \frac{kA_c (T_b - T_\infty) m \frac{I_1(2mL)}{I_0(2mL)}}{hA_f (T_b - T_\infty)} = \frac{I_1(2mL)}{mL I_0(2mL)} \quad (17)$$

### Parabolik kanat:



Şekil 4. Parabolik kanadın genel görünümü (General view of the parabolic fin).

$$x^2 \frac{d^2 T}{dx^2} + 2x \frac{dT}{dx} - m^2 L^2 (T - T_\infty) = 0 \quad (18)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 4 m^2 L^2} - 1), \quad \beta = -\frac{1}{2} (\sqrt{1 + 4 m^2 L^2} + 1) \quad (19)$$

Sınır koşulları;

$$i) \frac{d\theta(\bar{x})}{d\bar{x}} \Big|_{\bar{x}=0} = 0 \Rightarrow c_2 = 0 \quad (20)$$

$$ii) \theta(\bar{x}) \Big|_{\bar{x}=1} = 1 \Rightarrow \theta(\bar{x}) = c_1 + c_2 = 1, c_1 = 1 \quad (21)$$

$$\theta(\bar{x}) = \bar{x}^a \quad (22)$$

$$q_k = k A_c \frac{T_b - T_{\infty}}{L} \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 4m^2 L^2} - 1) \quad (23)$$

$$\eta_k = \frac{q_k}{q_{\text{maksimum}}} = \frac{k A_c \frac{T_b - T_{\infty}}{L} \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 4m^2 L^2} - 1)}{h A_f (T_b - T_{\infty})} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + 4m^2 L^2}} \quad (24)$$

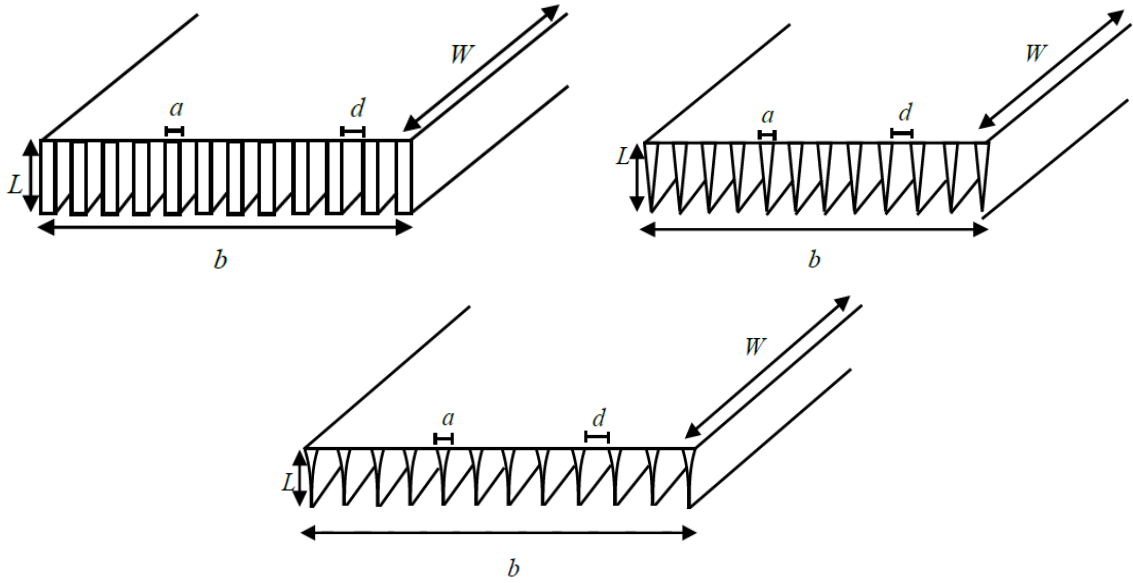
### 5.1 Analitik Çözüm (Analytical Solution)

Daha önce belirlenen üç tip kanatçık için elde edilmiş olan boyutsuz sıcaklık dağılım denklemleri kullanılarak

alınarak kullanılmıştır. Panelin ortalama hücre sıcaklığı 80 °C, ortam sıcaklığı ise 30 °C olarak alınmıştır.

$$Nu_{D_h} = 0.041900 \left( \frac{D_h}{D_{h0}} \right)^{0.28960} Re_{D_h}^{0.75738} \quad (25)$$

Denklem (25) ile ifade edilen Nusselt korelasyonu, Silva vd. [14] tarafından yapılmış ve amacı, hava soğutmalı PV panellere ilişkin teorik çalışmalarda kullanılmak üzere Nusselt sayısının bulunması olan deneysel çalışmadan alınmıştır. Literatürde yer alan söz konusu bu deneysel çalışmada kullanılan dikdörtgen şeklindeki kanatçık yapısının, bu çalışmada kullanılan kanatçık tiplerinden birisi ile uyumlu olması, bu korelasyonun seçiminde etkili olmuştur.



Şekil 5. Panellerin alt yüzeyine yerleştirilmiş, sırasıyla dikdörtgen, üçgen ve parabolik kanat dizilerinin şematik görünümü (Schematic view of rectangular, triangular and parabolic fin arrays placed on the bottom surface of the panels).

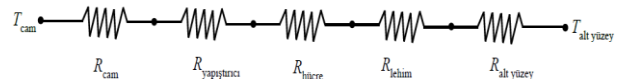
panellerin alt yüzeylerindeki ısı geçişleri ve kanatçık verimleri hesaplanmıştır. Şekil 5'te görüldüğü gibi, panellerin alt yüzeyine sırasıyla dikdörtgen, üçgen ve parabolik kanat dizileri yerleştirilmiştir.

Panellerin tümünde;  $a = 0.01$  m,  $b = 0.63$  m,  $L = 0.1$  m ve  $W = 1.47$  m olarak alınmıştır. Kanatçıkların yapıldığı malzeme alüminyum olarak seçilmiştir ve alüminyumun ısı iletim katsayısı 200 W/(m·K) olarak alınmıştır. Bu çalışmadaki ısı taşınım katsayısının hesaplanmasında; kanal geometrisinin dikdörtgen olması, bu kanalın alt tarafının açık olması ve kanatlar arası mesafenin değişken olması gibi hususlar göz önüne alınarak tüm hızlardaki akışların türbülanslı olduğu ve böylece Denklem 25 ile ifade edilen Nusselt korelasyonunun [14] kullanılabilmesi kabul edilmiştir. Denklem 25'de referans hidrolik çap olan  $D_{h0}$ , kanatçıklar arası boşluğu gösteren  $d$  için 0.006 m değeri esas alınarak hesaplanmıştır. Farklı hava hızlarında dikdörtgen kanat geometrisi için Denklem 25 kullanılarak hesaplanan ısı taşınım katsayıları, üçgen ve parabolik kanat geometrileri için yapılan ısı hesaplamalarda da, hava hızı dikkate

Panellerin altına kanatçık dizileri eklenmesi, hesaplanması gereken bir diğer parametreyi ortaya çıkarmıştır. Toplam yüzey verimi olarak adlandırılan bu parametreyi hesaplamak için kullanılan formül, Denklem 26'daki gibidir [15]:

$$\epsilon_{k,o} = \frac{q_{\text{toplam,k}}}{q_{\text{toplam,k,kanatçık}}} = \frac{A_{\text{kanatçık}} \eta_k A_k}{A_{\text{kanatçık}}} = 1 - \frac{N A_k}{A_{\text{toplam}}} (1 - \eta_k) \quad (26)$$

Elde edilen ısı geçişi değerleri kullanılarak, yapılan soğutma işleminin panelin ortalama hücre sıcaklığına ne kadar etkisi olacağı hesaplanmıştır. Bu hesap için öncelikle, panelin, Şekil 6'da görülen ısı direnç devresi çıkarılmış ve toplam ısı direnç hesaplanmıştır [16].



Şekil 6. Bir güneş panelinin yüzeyinden itibaren kanatçıkların ucuna kadar olan ısı direnç devresinin şematik görünümü (Schematic view of the thermal resistance circuit from the surface of a solar panel to the tip of the fins).



Toplam ısı direnç, 27 numaralı denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$R_{T,t} = R_{cam} + R_{yapıştırıcı} + R_{hücre} + R_{lehim} + R_{alt yüzey} \quad (27)$$

Elde edilen toplam ısı direnç ve daha önceden hesaplanan ısı geçişi değerleri 28 numaralı denklemde yerlerine yazılarak güneş panelinin dip sıcaklıkları bulunmuştur.

$$q = -\frac{\Delta T}{R_{T,t}} \quad (28)$$

Analitik çözüm sonucunda ulaşılan ısı geçişi miktarı, kanat verimi, kanat dip sıcaklığı ve ortalama etkenlik değeri Çizelge 2’de bir arada gösterilmiştir.

**Çizelge 2.** Analitik çözüm sonuçları (Analytical solution results).

Kanat tipi	Isı geçişi (W)	Kanat verimi	Kanat etkenliği	Toplam yüzey verimi	Ortalama hücre sıcaklığı (°C)
Dikdörtgen kanat	120.895	0.9107	4.2462	0.9267	62.245
Üçgen kanat	115.746	0.8749	3.9586	0.8982	63.002
Parabolik kanat	106.554	0.8054	3.7760	0.8409	64.352

## 5.2 Nümerik Çözüm (Numerical Solution)

Nümerik çözümde, dördüncü dereceden Runge-Kutta metodu kullanılmıştır. Daha önce elde edilen ve analitik olarak çözülen boyutsuz sıcaklık dağılımı denklemleri, her bir kanatçık tipi için ayrı ayrı nümerik yöntemle de çözülmüştür. Çözüm sırasında Runge-Kutta metoduyla elde edilen denklemleri birinci mertebeye indirebilmek için Shooting metodu kullanılmıştır [12].

Dikdörtgen kesitli kanatçık için denklemler:

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - m^2 L^2 \theta = 0 \quad (29)$$

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} + A \frac{d\theta}{dx} + B\theta = 0 \quad (30)$$

Shooting metodu:

$$\frac{d\theta}{dx} = w, \quad \frac{dw}{dx} = m^2 L^2 \theta \quad (31)$$

$$\frac{dw}{dx} + Aw + B\theta = 0 \quad (32)$$

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} = m^2 L^2 \theta, \quad B = m^2 L^2 \quad (33)$$

Denkleme iki sınır koşulu uygulanırsa:

$$i) \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0} = 0 \quad (34)$$

$$ii) \theta(1) = 1 \quad (35)$$

$$\frac{d\theta}{dx} = w, \quad K_1 = w, \quad K_2 = w, \quad K_3 = w, \quad K_4 = w \quad (36)$$

$$\frac{dw}{dx} = m^2 L^2 \theta, K_1 = m^2 L^2 \theta, K_2 = m^2 L^2 \theta, K_3 = m^2 L^2 \theta, K_4 = m^2 L^2 \theta \quad (37)$$

$$\theta_{i+1} = \theta_i + \frac{1}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4)h \quad (38)$$

Üçgen kanatçık için denklemler:

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{d\theta}{dx} - \frac{m^2 L^2 \theta}{x} = 0 \quad (39)$$

Shooting metodu:

$$\frac{dw}{dx} + Aw + B\theta = 0, \quad A = \frac{1}{x}, \quad B = -\frac{m^2 L^2}{x} \quad (40)$$

Aynı sınır koşulları uygulanırsa:

$$K_1 = -\frac{1}{x} w + \frac{m^2 L^2}{x} \theta \quad (41)$$

$$K_2 = -\frac{1}{x+\frac{1}{2}h} \left( w + \frac{1}{2} K_1 h \right) + \frac{m^2 L^2}{x+\frac{1}{2}h} \theta \quad (42)$$

$$K_3 = -\frac{1}{x+\frac{1}{2}h} \left( w + \frac{1}{2} K_2 h \right) + \frac{m^2 L^2}{x+\frac{1}{2}h} \theta \quad (43)$$

$$K_4 = -\frac{1}{x+h} (w + K_3 h) + \frac{m^2 L^2}{x+h} \theta \quad (44)$$

Parabolik kanatçık için denklemler:

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{2}{x} \frac{d\theta}{dx} - \frac{m^2 L^2 \theta}{x^2} = 0 \quad (45)$$

Shooting metodu:

$$\frac{dw}{dx} + Aw + B\theta = 0, \quad A = \frac{2}{x}, \quad B = -\frac{m^2 L^2}{x^2} \quad (46)$$

Aynı sınır koşulları uygulanırsa:

$$K_1 = -\frac{2}{x} w + \frac{m^2 L^2}{x^2} \theta \quad (47)$$

$$K_2 = -\frac{2}{x+\frac{1}{2}h} \left( w + \frac{1}{2} K_1 h \right) + \frac{m^2 L^2}{(x+\frac{1}{2}h)^2} \theta \quad (48)$$

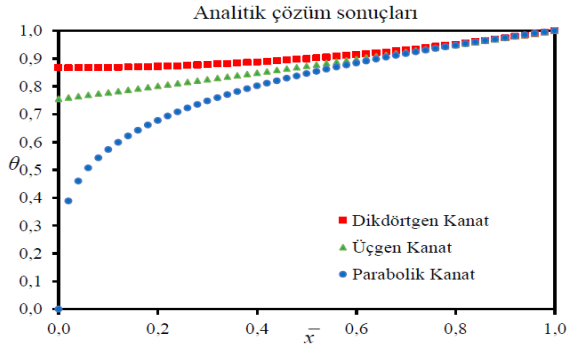
$$K_3 = -\frac{2}{x+\frac{1}{2}h} \left( w + \frac{1}{2} K_2 h \right) + \frac{m^2 L^2}{(x+\frac{1}{2}h)^2} \theta \quad (49)$$

$$K_4 = -\frac{2}{x+h} (w + K_3 h) + \frac{m^2 L^2}{(x+h)^2} \theta \quad (50)$$

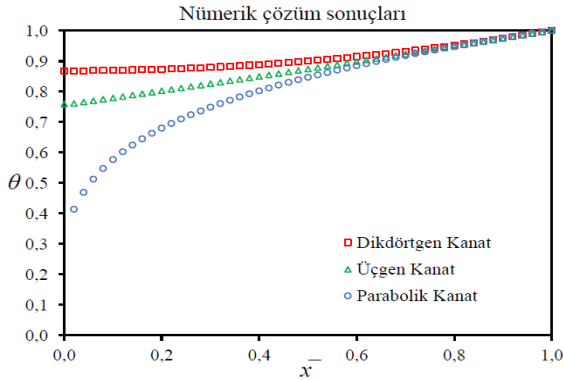
Sınır koşulları uygulandıktan ve elde edilen K değerleri boyutsuz sıcaklık dağılımı denkleminde yerlerine yazıldıktan sonra Excel yardımıyla hesaplamalar yapılmıştır. İterasyonlar; 0.01, 0.001 ve 0.0001 olmak üzere üç farklı boyutsuz adım için yapılmıştır. Nümerik çözümler sonucu elde edilen ısı geçişi ve verim değerleri Çizelge 3’te verilmiştir.

## 6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu teorik çalışmada; dikdörtgen, üçgen ve parabolik olmak üzere üç farklı kanatçık tipi incelenmiştir. Hesaplamalar her bir kanatçık tipi için analitik ve nümerik olarak yapılmıştır. Her bir kanatçık tipi için sıcaklık dağılımları ve ısı geçişleri iki farklı yöntemle hesaplanmıştır. Üç kanatçık tipi için de sıcaklık dağılımlarının analitik sonucu Şekil 7’de nümerik sonucu ise Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 7. Her üç kanatçık tipi için de analitik çözüm sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of analytical solution results for all three fin types).

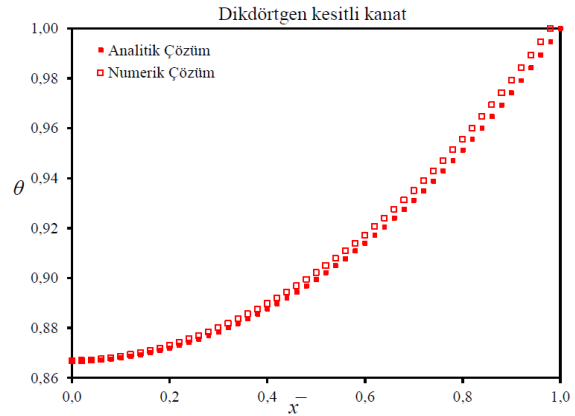


Şekil 8. Her üç kanatçık tipi için de nümerik çözüm sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of numerical solution results for all three fin types).

Kanatçık tipleri incelenirken dört önemli parametre dikkate alınmıştır. Bunlar; sıcaklık dağılımı, ısı geçiş miktarı, kanatçıkların verimi ve kanatçıkların etkinliğidir. Kanatçık tipleri bu dört parametreye göre karşılaştırılmış ve bazı sonuçlar elde edilmiştir.

Kanatçıkları sıcaklık dağılımına göre incelediğimizde, parabolik kanatçıkta sıcaklık farkının en fazla olduğu görülmüştür. Normalde sıcaklık farkının artması, ısı geçişini artırır. Ancak, kanatçık tipleri ısı geçişi açısından incelendiğinde, dikdörtgen kesitli kanatçık tipinde maksimum ısı geçişinin olduğu görülmektedir. Bu çalışmanın temel amacı, ısı geçişini artırmaktır, bu nedenle dikdörtgen kanatçık tipi diğerlerine göre üstünlük gösterir. Isı geçiş miktarları kullanılarak, bir başka önemli parametre olan kanatçık verimi de hesaplanmıştır. Hesaplanan verimler karşılaştırıldığında, en yüksek verimin doğal olarak yine dikdörtgen kesitli kanatçıklarda bulunduğu görülmektedir.

Üç farklı kanatçık tipi için üç farklı diferansiyel denklem elde edilmiştir. Sıcaklık dağılımları, ısı geçişi, verim ve etkinlik, üç kanatçık tipi için de analitik yöntemle hesaplanmıştır. Daha sonra aynı parametreler, aynı kanatçık tipleri için nümerik bir yöntem olan Runge-Kutta yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır, ancak parabolik kanatçık tipinin nümerik çözümü yapılırken bir sorunla karşılaşmıştır. Parabolik kanatçığın sınır koşullarından birisi, ilgili denklemini Runge-Kutta metoduyla çözülemeyecek hale (tanımsız hale) getirmektedir. Bu nedenle, denklemin tanımsız yapan sınır koşuluna yakın bir değer olarak denklemin tanımsız olması önlenmiştir. Şekil 9’da görüldüğü gibi, dikdörtgen kesitli kanatçık için analitik ve nümerik



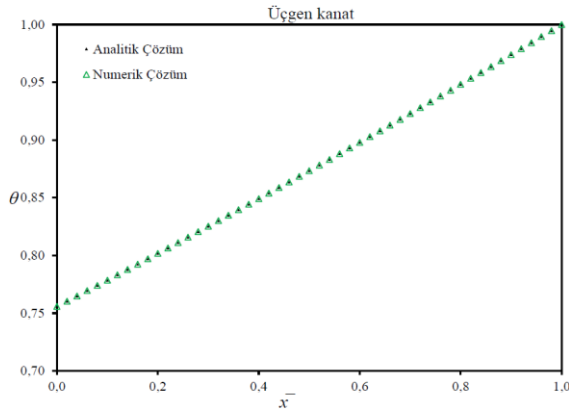
Şekil 9. Dikdörtgen kanatçıklardaki sıcaklık dağılımı için analitik ve nümerik çözüm sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of analytical and numerical solution results for temperature distribution in rectangular fins).

Çizelge 3. Analitik ve nümerik çözüm sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of analytical and numerical solution results).

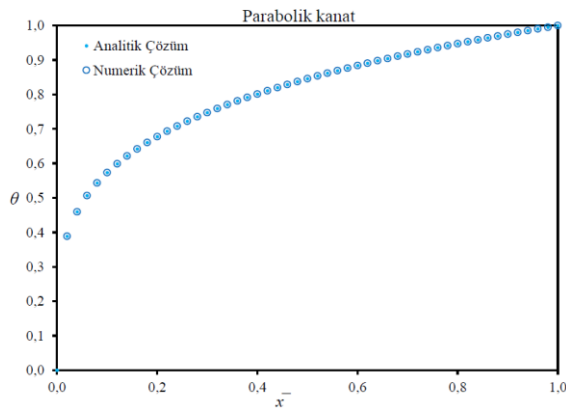
Kanat tipi	Analitik çözüm sonucu		Nümerik çözüm sonucu	
	Isı geçişi (W)	Kanat verimi	Isı geçişi (W)	Kanat verimi
Dikdörtgen kanat	120.89484	0.91070	120.48572	0.904547
Üçgen kanat	115.74592	0.87487	115.74460	0.874865
Parabolik kanat	106.55435	0.80540	106.54898	0.805359

yöntemlerle bulunan sıcaklık dağılımları arasında çok az fark vardır.

Ancak, Şekil 10 ve Şekil 11'den de görüleceği üzere, analitik ve nümerik yöntemlerle elde edilen sıcaklık dağılımı, üçgen ve parabolik kanatçık tiplerinde neredeyse aynıdır. Özellikle üçgen kanatçık için analitik ve nümerik olarak elde edilen sonuçlar birbirine çok yakındır. Bu husus, sıcaklık dağılımının gösterildiği Şekil 10'da oldukça belirgindir.



**Şekil 10.** Üçgen kanatçıklardaki sıcaklık dağılımı için analitik ve nümerik çözüm sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of analytical and numerical solution results for temperature distribution in triangular fins).



**Şekil 11.** Parabolik kanatçıklardaki sıcaklık dağılımı için analitik ve nümerik çözüm sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of analytical and numerical solution results for temperature distribution in parabolic fins).

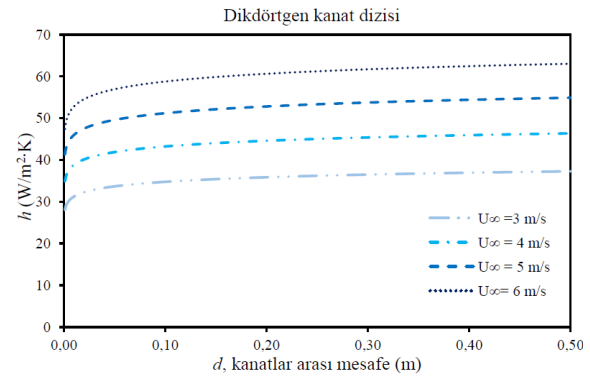
Analitik ve nümerik bakımdan karşılaştırılabilecek diğer özellikler ise ısı geçişi ve verimdir. Üç kanatçık tipinde analitik ve nümerik olarak hesaplanan ısı geçişi ve verim değerleri incelendiğinde, üçgen ve parabolik kanatçıklar için ısı geçişi ve verim değerleri hemen hemen aynıdır, ancak dikdörtgen kanatçık için değerlerde küçük bir fark vardır.

Dördüncü dereceden Runge-Kutta yöntemi, üç kanatçık tipi için sıcaklık dağılımı, ısı geçişi ve verim

hesaplamalarında görüldüğü gibi analitik çözümlere çok yakın sonuçlar veren iyi bir nümerik yöntemdir.

Bilindiği gibi, ısı taşınım katsayısının hesaplanabilmesi için çeşitli Nusselt korelasyonlarına ihtiyaç vardır. Literatürde, bu çalışma kapsamında incelenen kanatçık dizilerinden sadece dikdörtgen kesitli kanatçık dizisi için korelasyonlar bulunabildiği için, ısı taşınım katsayısı, kanat verimi ve ortalama hücre sıcaklığı sadece bu kanatçık dizisi için hesaplanmıştır.

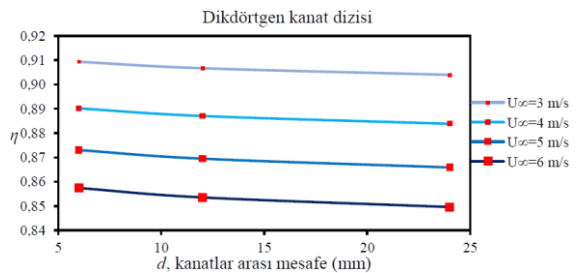
Kullanılan Nusselt korelasyonu, deneysel bir çalışmadan alındığı için gerçek durumu göstermektedir. Kanatçıklar arasındaki boşluğun artması akışkanın hareketini kolaylaştırır. Kanatçıklar arasındaki boşluğu artırmak, ısı taşınım katsayısını belirli bir miktar artırmaktadır. Şekil 12'de de görüldüğü gibi, artan ısı taşınım katsayısı, kanatlar arası mesafenin belirli bir değerinden sonra ihmal edilebilir bir artış göstermektedir. Isı taşınım katsayısını etkileyen diğer bir parametre, akışkanın hızıdır. Yine, Şekil 12'de görüldüğü gibi, akışkan hızındaki artış, ısı taşınım katsayısını artırmaktadır.



**Şekil 12.** Farklı akış hızlarındaki ısı taşınım katsayısının, kanatlar arası mesafe ile değişimi (Variation of heat transfer coefficient at different flow rates with the distance between the fins).

Akışkanın hızı arttığında, soğutulacak yüzeye birim zamanda çarpan akışkan parçacıkların sayısının artması bu sonucu doğurmaktadır.

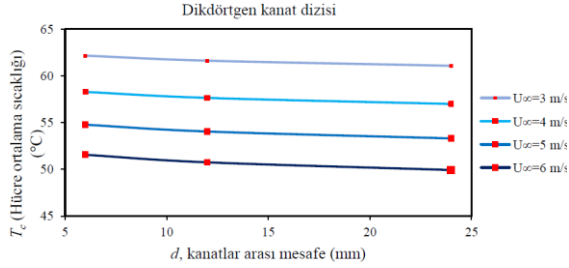
Şekil 13'ten de kolayca görülebildiği gibi, kanatçıklar arasındaki boşluğu artırmak kanat verimini azaltmaktadır. Bu durumun nedeni, kanatçıklar



**Şekil 13.** Farklı akış hızlarındaki kanat veriminin, kanatlar arası mesafe ile değişimi (Variation of fin efficiency at different flow rates with distance between fins).

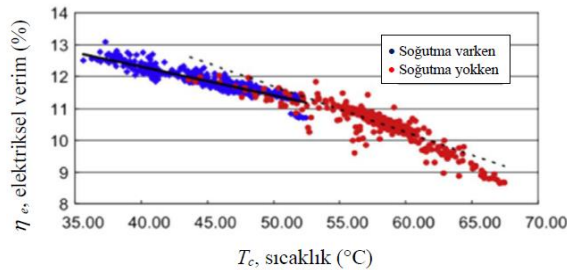
arasındaki boşluk arttığında, ısı geçiş yüzeyinin azalmasıdır. Verim formülü,  $\eta = q_f/q_{maks}$  şeklindedir. Bu nedenle, ısı geçişi azaldığında, verim düşmektedir.

Şekil 14'te, akışkanın hızı arttığında ortalama hücre sıcaklığının azaldığı görülmektedir. Isı geçişi, akışkanın hızı arttıkça artar ve kanatçıklar arası boşluk optimum mesafede olur. Isı geçişi miktarının artırılması, PV panellerin ortalama hücre sıcaklığını azaltmaktadır.



**Şekil 14.** Farklı akış hızlarındaki ortalama hücre sıcaklığının, kanatlar arası mesafe ile değişimi (The variation of the average cell temperature at different flow rates with the distance between the fins).

Şekil 15, daha önce yapılmış deneysel bir çalışmanın [17] sonuçlarını göstermektedir. Deneysel sonuçlara göre, ortalama hücre sıcaklığındaki düşüşün panel verimini önemli ölçüde artırdığı açıkça görülmektedir. Buradan hareketle, bu teorik çalışmanın sonuçları, daha önce yapılmış bir deneysel çalışmanın [17] sonuçlarıyla da desteklenmiştir.



**Şekil 15.** Güneş panelinin elektriksel veriminin hücre ortalama sıcaklığı ile değişimi (The variation of the electrical efficiency of the solar panel with the average cell temperature) [17].

Bu teorik çalışmada elde edilen grafiklerden hareketle aşağıdaki çıkarımlarda bulunulabilir:

Güneş panellerinin ortalama hücre sıcaklığı, kanatçıklar üzerinden geçen ısı miktarının artmasıyla azalır. Bu durum, panelin elektrik üretim verimini önemli ölçüde artırmaktadır.

Analitik ve nümerik çözümler karşılaştırıldığında; Runge-Kutta yönteminin, analitik çözüme çok yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu nedenle; Runge-Kutta yönteminin, analitik olarak çözülemeyen kanatçık tipleri için uygun bir yöntem olduğu ifade edilebilir.

Kanatçıklar arasından geçen havanın türbülanslı olması ısı geçişini artırır. Bu durum, elektrik üretimini ve dolayısıyla panel verimini artırmaktadır.

Şekil 12 incelendiğinde, kanat dizileri için kanatlar arası mesafenin kritik değeri yaklaşık 0.15 cm'dir. Kanatlar arası mesafenin 0.15 cm'den sonra artırılması, ısı geçişini ihmal edilebilecek kadar az miktarda artırmaktadır.

Kanatçıkların çok sık veya çok seyrek yerleştirilmesi panel verimini olumsuz yönde etkilemektedir.

Kanatçığın geometrisi, yani kanatçıkların dikdörtgen, üçgen veya parabolik olması, güneş panelinin verimini etkilemektedir.

Şekil 7 ve Şekil 8'de yer alan sıcaklık dağılımları incelendiğinde; parabolik kanatçık tipinde maksimum sıcaklık farkının oluştuğu görülür, ancak en büyük miktarda ısı geçişi dikdörtgen kanatçık tipinde gerçekleşmektedir.

Tablo 2 incelendiğinde; dikdörtgen kesitli kanatçığın; kanat verimi, kanat etkenliği, toplam yüzey verimi ve ortalama hücre sıcaklığını düşürme bakımından en iyi tip kanatçık olduğu açıkça görülmektedir.

Çalışmada; alt yüzeyine kanatlar yerleştirilmiş PV panelin ortalama hücre sıcaklıklarının, kanatsız PV panele göre, hava hızı, kanatçıklar arası boşluk ve kanatçık tipi gibi parametrelere bağlı olarak 8 °C ila 26 °C daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Hücre ortalama sıcaklıklarındaki bu düşüş, literatürdeki deneysel verilere göre, beraberinde yaklaşık %6 ila %11.5 arasında bir elektriksel verim artışı sağlayacaktır.

Çalışmada ayrıca; dikdörtgen kanatların, üçgen kanatlardan %4.1 ila %6.7, parabolik kanatlardan ise %13.2 ila %15.3 daha fazla ısı geçişi sağladığı tespit edilmiştir.

Yapılan bu teorik çalışma, Elbreki vd. [4] tarafından yapılan deneysel çalışma ile karşılaştırılmış ve PV panelin ortalama hücre sıcaklığındaki maksimum düşüşün 1.4 °C (26 °C - 24.6 °C) sapma gösterdiği, elektriksel verimin artışı bakımından yapılan karşılaştırmada ise sapmanın yaklaşık %7.6 civarında olduğu görülmüştür.

## SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

$a$	Kanatçığın eni, [m]
$A$	Kanatçığın yüzey alanı, [m <sup>2</sup> ]
$A_c$	Kanatçık kesit alanı [m <sup>2</sup> ]
$b$	Güneş panelinin eni, [m]
$d$	İki kanatçık arasındaki mesafe, [m]
$D_h$	Hidrolik çap, [m]
$D_{ho}$	Referans hidrolik çap, [m]
$E$	Enerji, [W]
$h$	Isı taşınım katsayısı, $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$

$k$	Isı iletim katsayısı, $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$
$L$	Kanatçığin boyu, [m]
$m$	Kanatçık parametresi, $\left[\frac{1}{m}\right]$
$Nu_{Dh}$	Nusselt korelasyonu, Denklem 25'te tanımlanmıştır.
$P$	Kanatçık kesitinin çevre uzunluğu, [m]
$q$	Isı geçişi, [W]
$R$	Isıl direnç, $\left[\frac{K}{W}\right]$
$Re$	Reynolds sayısı, $\left[\frac{UD_h}{\nu}\right]$
$R_{T,t}$	Toplam ısı direnç, $\left[\frac{K}{W}\right]$
$T$	Sıcaklık, [°C veya K]
$T_{\infty}$	Kanatçıklar üzerinden akan havanın sıcaklığı, [°C]
$T_b$	Kanatçık dip sıcaklığı, [°C]
$U$	Hız, $\left[\frac{m}{s}\right]$
$V$	Gerilim, [V]
$W$	Güneş panelinin uzunluğu, [m]
$\bar{x}$	Boyutsuz kanatçık uzunluğu, $\left[\frac{x}{L}\right]$
$\varepsilon_{k,o}$	Toplam yüzey verimi, $\left[\frac{q_{toplam,k}}{q_{toplam,kanatsız}}\right]$
$\eta$	Kanat verimi, $\left[\frac{q_k}{q_{maksimum}}\right]$
$\theta$	Boyutsuz sıcaklık, $\left[\frac{T - T_{\infty}}{T_b - T_{\infty}}\right]$

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Kemal BİLEN:** Çalışmadaki teorik modeli kurgulamış, elde edilen sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

**Bilal IŞIK:** Çalışmadaki teorik modeli kurgulamış, elde edilen sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

**Sultan GEZER:** Çalışmadaki teorik modeli kurgulamış, elde edilen sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

**Furkan KIYIK:** Çalışmadaki teorik modeli kurgulamış, elde edilen sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Stropnik R. and Stritih U., 'Increasing the efficiency of PV panel with the use of PCM', *Renewable Energy*, 97: 671-679, (2016).
- [2] Grubisic-Cabo F., Nizetic S., Coko D., Kragic I. M., Papadopoulos A., 'Experimental Investigation of the Passive Cooled Free-standing Photovoltaic Panel with Fixed Aluminum Fins on the Backside Surface', *Journal of Cleaner Production*, 176: 119-129, (2018).
- [3] Özakin A. N. and Kaya F., 'Effect on the Exergy of the PVT System of Fins Added to an Air-cooled Channel: A Study on Temperature and Air Velocity with ANSYS Fluent', *Solar Energy*, 184: 561-569, (2019).
- [4] Elbreki A. M., Muftah A. F., Sopian K., Jarimi H., Fazlizan A., Ibrahim A., 'Experimental and Economic Analysis of Passive Cooling PV Module using Fins and Planar Reflector', *Case Studies in Thermal Engineering*, 23: 100801, (2020).
- [5] Hernandez-Perez J. G., Carrillo J. G., Bassam A., Flota-Banuelos M., Patino-Lopez L. D., 'Thermal Performance of a Discontinuous Finned Heatsink Profile for PV Passive Cooling', *Applied Thermal Engineering*, 183: 116238, (2020).
- [6] Bayrak F., Oztop H. F., Selimefendigil F., 'Experimental Study for the Application of Different Cooling Techniques in Photovoltaic (PV) Panels', *Energy Conversion and Management*, 212: 112789, (2020).
- [7] <http://www.enerjibes.com> (Aralık 2020).
- [8] <http://www.enerjimag.com> (Aralık 2020).
- [9] Fesharaki V. J., Dehghani M., Fesharaki J. J., and Tavasoli H., 'The Effect of Temperature on Photovoltaic Cell Efficiency', *Proceedings of the 1st International Conference on Emerging Trends in Energy Conservation - ETEC Tehran*, Tehran Iran, 1-6, 20-21 November (2011).
- [10] Grubišić-Čabo F., Nižetić S., Marco T. G., 'Photovoltaic Panels: A Review of the Cooling Techniques', *Transactions of Famena XL - Special Issue 1*: 63-74, (2016).
- [11] <http://www.coolermastercorp.com> (Aralık 2020).
- [12] Gilat A., Subramaniam V., 'Chapter 10 Ordinary Differential Equations, Numerical Methods for Engineers and Scientists', 3<sup>rd</sup> Edition, *John Wiley & Sons*, USA, (2014).
- [13] Bergman T. L., Lavine A. S., Incropera F. P., Dewitt D. P., 'Chapter 3 Heat Transfer from Extended Surfaces, Fundamentals of Heat and Mass Transfer', 7<sup>th</sup> Edition, *John Wiley & Sons*, USA, (2011).

- [14] Silva M. J., Zdanski P. S. B., Vaz Jr. M., 'Forced Convection on Grey Cast Iron Plate-Fins: Prediction of the Heat Transfer Coefficient', *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 81: 1-7, (2017).
- [15] Cengel Y. A., Ghajar A. J., 'Chapter 3 Steady Heat Conduction, Heat and Mass Transfer', 5<sup>th</sup> Edition, *Mc Graw Hill Education*, USA, (2015).
- [16] Cruey B., King J., Tingleff B., 'Cooling of Photovoltaic Cells', December 7, (2006).
- [17] Ahmed O. K., Mohammed Z. A., 'Influence of Porous Media on the Performance of Hybrid PV/Thermal Collector', *Renewable Energy*, 112: 378-387, (2017).