



**TEZ BAŞLIĞI SANDVIÇ ÇATI PANEL GEOMETRİK
ÖZELLİKLERİNİN FOTOVOLTAİK MODÜL
PERFORMANSI ÜZERİNE OLAN ETKİLERİNİN
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Beytullah İsmet TOPRAK

Danışman: Prof. Dr. İsmail SOLMAZ

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**SANDVIÇ ÇATI PANEL GEOMETRİK ÖZELLİKLERİNİN FOTOVOLTAİK
MODÜL PERFORMANSI ÜZERİNE OLAN ETKİLERİNİN DENEYSEL VE
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

(Experimental And Numerical Investigation Of The Effects Of Sandwich Roof Panel
Geometrical Properties On Photovoltaic Module Performance)

DOKTORA TEZİ

Beytullah İsmet TOPRAK

Danışman: Prof. Dr. İsmail SOLMAZ

Erzurum
Şubat, 2025

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

SANDVIÇ ÇATI PANEL GEOMETRİK ÖZELLİKLERİNİN FOTOVOLTAİK MODÜL
PERFORMANSI ÜZERİNE OLAN ETKİLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ

Prof. Dr. İsmail SOLMAZ danışmanlığında, Beytullah İsmet TOPRAK tarafından hazırlanan bu çalışma, 28/02/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Bilim Dalı'nda doktora tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (.../...) ile kabul edilmiştir.**

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Kadir BİLEN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. İsmail SOLMAZ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Mehmet Emin ARZUTUĞ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. FARAZ AFŞAR <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. EDA FEYZA AKYÜREK <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim
Kurulunun .../.../... tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Alper Nuhoglu
Enstitü Müdürü
Aslı Islak İmzalıdır

Bu çalışma Atatürk Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü tarafından FDK-2022-11165 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora tezi olarak Prof. Dr. İsmail SOLMAZ danışmanlığında sunulan “SANDVIÇ ÇATI PANEL GEOMETRİK ÖZELLİKLERİNİN FOTOVOLTAİK MODÜL PERFORMANSI ÜZERİNE OLAN ETKİLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	1	30
Kuramsal Temeller	6	30
Materyal ve Metot	4	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	1	20
Sonuçlar ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	4	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Beytullah İsmet TOPRAK	Prof. Dr. İsmail SOLMAZ
7.2.2025	7.2.2025
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayımlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışması sürecime görüş ve düşünceleriyle büyük katkılar sunan, akademik hayatım boyunca sonsuz desteğini esirgemeyen değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. İsmail SOLMAZ' a en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Tez izleme jürimin değerli üyeleri Sayın Prof. Dr. Kadir BİLEN, Sayın Doç. Dr. Mehmet Emin ARZUTUĞ, Sayın Doç. Dr. Faraz AFŞAR ve Doç. Dr. Eda Feyza AKYÜREK' e de tez çalışmama değerli görüşleriyle sundukları katkılardan dolayı ayrıca teşekkür ederim.

Doktora tez çalışmamda FDK-2022-11165 numaralı proje ile sağladıkları ekonomik destekten dolayı Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Sadece tezimin hazırlanma aşamasında değil hayatımın her döneminde hep yanımda olan sevgili eşim Aynur'a, oğullarım Ömer Agâh ve Ali Mahir'e ve çok kıymetli aileme sonsuz sevgi ve şükranlarımı sunarım.

Beytullah İsmet TOPRAK

ÖZET

DOKTORA TEZİ

SANDVIÇ ÇATI PANEL GEOMETRİK ÖZELLİKLERİNİN FOTOVOLTAİK MODÜL PERFORMANSI ÜZERİNE OLAN ETKİLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Beytullah İsmet TOPRAK

Danışman: Prof. Dr. İsmail SOLMAZ

Amaç: Yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıtların aksine kirlilik üretmeyen çevre dostu enerji kaynaklarıdır. Diğer tüm enerji kaynaklarına kıyasla güneş enerjisi, bol ve tükenmez, en temel enerji kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır. Güneşten gelen enerjiyi elektrığe dönüştürerek günlük kullanımımıza sunan fotovoltaik (PV) paneller, üzerine düşen güneş ışınlarının büyük bir kısmını emme kabiliyetine sahip olsalar da bunun yüzde olarak sadece çok az bir kısmını elektrığe dönüştürebilmektedirler. PV hücre verimliliğini arttırabilmek amacıyla bu tez kapsamında PV panellerin montajının yapıldığı sandviç çatı profillerinin geometrik yapılarının ve aynı zamanda çatı-PV panel arasındaki mesafelerin farklı güneş ışınım şiddeti ve rüzgar hızlarında panel performansına olan etkisi incelenmiştir.

Yöntem: Bu amaç doğrultusunda laboratuvar ortamında kurulan deney düzeneği ile oluklu sandviç çatı üzerine montajı yapılan mono-kristal PV panelin sabit ışınım şiddeti altında elektriksel güç analizi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmayla PV panelin sıcaklığının elektriksel verim üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bununla beraber çatı-PV panel arasında oluşturulan kanaldan farklı hızlarda hava akışı geçirilerek oluklu çatının PV panel sıcaklığına olan etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmaların ardından COMSOL Multiphysics programı ile farklı sandviç çatı geometrileri üzerinde parametrik sayısal çalışmalar yürütülmüştür.

Bulgular: Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalarda hava akış hızı arttıkça PV panel sıcaklığının düştüğü ve buna bağlı olarak elektriksel verimliliğin arttığı gözlemlenmiştir. Işınım şiddetinin artması ise PV panel sıcaklığını doğrusal olarak arttırmış ve bu da PV panelin elektriksel verimliliğini düşürmüştür. Çalışılan aralıkta PV panel-çatı arasındaki mesafenin kısalmasıyla PV panel sıcaklığının düştüğü gözlemlenmiştir. Son olarak farklı geometrik yapıya sahip sandviç çatılar kullanılarak yürütülen çalışmalarda ise PV panelin, üzerine monte edildiği sandviç çatının geometrik yapısının panel sıcaklığına ve performansına önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür.

Sonuç: Yapılan deneysel çalışmalarda PV panel ortalama yüzey sıcaklığının her 1 °C'lik artışıyla elektriksel güç çıkışında ortalama 0,82 W'lık bir düşüş yaşandığı belirlenmiştir. Yürütülen sayısal çalışmalarda uygulanan ışınım şiddetinin her 100 W/m²'lik artışıyla ortalama PV panel yüzey sıcaklığı 2,84 °C yükselmiş ve elektriksel verim ise %0,14 seviyesinde azalmıştır. Akış halindeki havanın, akışı bozan çatı geometrisi sayesinde sürekli olarak yukarı ve aşağı hareketinin, çatı-PV panel arasındaki mesafenin azalması ile havanın ısı transferi performansını arttırdığı görülmüştür. Akışı bozma ve yönlendirme etkileri göz önünde bulundurularak tasarlanan Model A ve Model B çatı geometrilerinin akış yönlendirme kabiliyetinden dolayı PV panel yüzeyine çarpan havanın daha etkin bir soğutma performansı göstermesi ve bu sayede PV panelin elektriksel performansının artırılması sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik, Çatı, Comsol CFD analizi, Soğutma teknikleri, Elektriksel verimlilik, Güneş enerjisi.

Şubat 2025, 98 sayfa

ABSTRACT

Ph. D. DISSERTATION

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF SANDWICH ROOF PANEL GEOMETRICAL PROPERTIES ON PHOTOVOLTAIC MODULE PERFORMANCE

Beytullah İsmet TOPRAK

Supervisor: Prof. Dr. İsmail SOLMAZ

Purpose: Renewable energy sources are environmentally friendly energy sources that, unlike fossil fuels, do not produce pollution. Compared to all other energy sources, solar energy is the most abundant and inexhaustible source of energy. Photovoltaic (PV) panels, which convert the energy from the sun into electricity for our daily use, have the ability to absorb a large portion of the sun's rays falling on them, but only a very small percentage of it can be converted into electricity. In order to increase PV cell efficiency, in this thesis, the effect of the geometric structures of the sandwich roof profiles where the PV panels are mounted, as well as the distances between the roof and the PV panel on the panel performance at various solar radiation intensities and wind velocities were investigated.

Method: For this purpose, the electrical power analysis of a mono-crystalline PV panel mounted on a corrugated sandwich roof under constant radiation intensity was carried out with the experimental setup established in the laboratory environment. The effect of the temperature of the PV panel on the electrical efficiency was analyzed. In addition, the effect of the corrugated roof on the PV panel temperature was experimentally investigated by passing air flow at various velocities through the channel formed between the roof and the PV panel. After the experimental studies, parametric numerical studies were carried out on different sandwich roof geometries with COMSOL Multiphysics program.

Findings: In experimental and numerical studies it has been observed that as the air flow rate increases, the PV panel temperature decreases and the electrical efficiency increases accordingly. Increasing the radiation intensity increased the PV panel temperature and this decreased the electrical efficiency of the PV panel. It is observed that the PV panel temperature decreases with the shortening of the distance between the PV panel and the roof. In the studies conducted using sandwich roofs with different geometric structures, it was observed that the geometric structure of the sandwich roof on which the PV panel is mounted has a significant effect on the panel temperature and performance.

Results: It was observed that for every 1 °C increase in the average surface temperature of the PV panel, there is an average decrease of 0,82 W in the electrical power output. In the numerical studies conducted, for every 100 W/m² increase in the applied irradiance, the average PV panel surface temperature increased by 2,84 °C and the electrical efficiency decreased by 0,14%. The continuous upward and downward movement of the flowing air due to the flow-distorting roof geometry is seen to increase the heat transfer performance of the air by reducing the distance between the roof and the PV panel. Due to the flow diversion capability of the Model A and Model B roof geometries designed by considering the flow disturbance and diversion effects, the air hitting the PV panel surface shows a more effective cooling performance and thus the electrical performance of the PV panel is increased.

Keywords: Photovoltaic, Roof, Comsol CFD analysis, Cooling techniques, Electrical efficiency, Solar energy.

February 2025, 98 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL ve ONAY TUTANAĞI	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xii
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	6
Global Ölçekte Kullanılan Enerji Dağılımı	6
Yenilenebilir Enerji Kaynakları	7
Güneş Enerjisi	9
PV Panel Vasıtasıyla Elektrik Üretimi.....	11
Elektriksel Verim Arttırma Yöntemleri	13
MATERYAL VE METOT	20
Deney Düzeneği.....	20
Demir Standın Tasarlanması ve Üretimi.....	21
Hava Giriş Kanalı (Redüktör)	23
Fotovoltaik (PV) Panel.....	24
Güneş Işınımı Simülatörü	25
Güneş Işınım Şiddeti Ayarı.....	26
Güneş Işınım Ölçüm Cihazı	26
Güneş Modülü Güç Ölçüm Cihazı (MPPT).....	27
Fan ve İnvertör	29
Hız Ölçer	30
Veri Toplama ve Kayıt Sistemi.....	31
Deney Düzeneğinin Kurulumu ve Montaj Aşaması	32
Deney Prosedürü	37
PV panel sıcaklığına göre elektriksel güç üretiminin incelenmesi	39
Hava akış hızına göre PV panel sıcaklığının incelenmesi	39
Deneysel Hata Analizi	40

Termodinamik Analiz	41
Kontrol Hacminde Kütlenin Korunumu (Süreklilik)	41
Kontrol hacmi için enerjinin korunumu	42
Elektriksel Analiz.....	43
Sayısal Prosedür	44
Matematiksel model	44
Sayısal Modelin Doğrulanması	48
Çözüm Ağı (Mesh) Bağımsızlaştırma.....	52
Parametrik Analizlerin Kapsamı	53
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	56
PV Panel-Çatı Sisteminin Parametrik Analizi	56
PV Panel Sıcaklığının Elektriksel Verimliliğe Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi	56
Rüzgar Hızının PV Panel Performansına Etkisi	58
Güneş Işınım Şiddetinin PV Panel Performansına Etkisi	60
PV Panel-Çatı Arasındaki Mesafenin PV Panel Performansına Etkisi (Sabit akışkan hızı)	62
PV Panel-Çatı Arasındaki Mesafenin PV Panel Performansına Etkisi (Sabit akışkan debisi).....	66
Sandviç Çatı Geometrisinin PV Panel Sıcaklığına ve Elektriksel Performansına Etkisi	68
Çatı Hatve Yüksekliğinin (H) ve Hatve Mesafesinin (W) PV Panel Sıcaklığına ve Elektriksel Performansına Etkisi.....	72
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	76
KAYNAKLAR.....	78
ÖZGEÇMİŞ.....	83

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Deneyisel Çalışmada Kullanılan Mono-Kristal PV Panelin Standart Test Koşullarındaki Teknik Özellikleri.....	25
Tablo 2. Deney Matrisi.....	40
Tablo 3. Ölçülen Parametrelere Ait Hata Analizinde Kullanılan Hassasiyet Değerleri.....	41
Tablo 4. PV Panel Isı Transferi Parametreleri.....	43
Tablo 5. Sınır Şartları.....	46
Tablo 6. k - ϵ Model Sabitleri.....	47
Tablo 7. PV Panel Katmanları Ve Termo-Fiziksel Özellikleri.....	48
Tablo 8. Eleman Sayısından Bağımsız Çözüm Elde Etme Testleri.....	52
Tablo 9. Etkisi İncelenen Parametreler ile Bu Parametrelerin Değişim Aralığı ve Baz Değerleri.....	54

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Fotovoltaik paneli bir araya getiren katmanların şematik gösterimi.....	3
Şekil 2. 2023 yılı sonu itibarıyla global ölçekte kaynaklara göre enerji tüketimi dağılımı	6
Şekil 3. 2000-2028 yılları arasında elektrik enerjisi üretimi amacıyla global ölçekte kullanılan ve kullanılacağı ön görülen yenilenebilir enerji kaynakları dağılımı	9
Şekil 4. Dünya üzerine dik açıyla düşen yıllık ortalama güneş radyasyonu	10
Şekil 5. 2022 yılı boyunca Türkiye üzerine dik açıyla düşen toplam güneş radyasyonu.....	11
Şekil 6. PV hücrelerin çalışma prensibi	12
Şekil 7. Güneş spektrumu.....	13
Şekil 8. PV hücrelerin hava akışkanı kullanılarak soğutulduğu aktif bir soğutma yöntemi	14
Şekil 9. PV hücrelerin alüminyum kanatçıklar kullanılarak soğutulduğu pasif bir soğutma yöntemi	16
Şekil 10. Çatı panel profilinin bir evin ısı izolasyon verimine olan etkisi incelenirken kullanılan farklı çatı panel profilleri.....	17
Şekil 11. Üzerlerine monte edilen PV panellerle olan ısı etkileşimi incelenen çatı tipleri a) kiremit b) kare trapez c) Orientile	18
Şekil 12. Deney düzeneği şematik gösterimi (1. Demir stant, 2. Hava giriş kanalı, 3. PV panel, 4. Sandviç çatı, 5. Fan, 6. İnvertör 7. Halojen projektörler, 8. Veri toplama cihazı, 9. Güç ölçüm cihazı, 10. Güneş ışıyım ölçüm cihazı 11. Anemometre, 12. Bilgisayar)	21
Şekil 13. Tasarlanan demir standın teknik çizimi	22
Şekil 14. PV panel, çatı malzemesi ve halojen projektörlerin yerleştirileceği demir standın son hali.....	23
Şekil 15. a) Kanal redüktörü şematik gösterimi. b) Kanal redüktörü fotoğrafı.....	24
Şekil 16. a) Redüktör içerisine yerleştirilen dağıtıcı köpük levhalar.	24
Şekil 17. Deneysel çalışmada kullanılan mono-kristal PV panele ait görsel.	25
Şekil 18. Laboratuvar ortamında güneşi simüle etmek için kullanılan halojen projektör.....	26
Şekil 19. a) PV panel üzerinde ışıyım ölçümü yapılan noktalar b) Işıyımın şiddetini ölçmek için kullanılan güneş ışıyım ölçüm cihazının görseli ve teknik özellikleri.	27
Şekil 20. Güneş modülü güç ölçüm cihazı.	28
Şekil 21. Güneş modülü güç ölçüm cihazı ile elde edilen akım-gerilim (kırmızı) ve güç çıktısı (yeşil) eğrisi (güç ölçüm cihaz yazılımı ara yüzü).....	29
Şekil 22. a) Deneylerde kullanılan fan ve invertör, b) Fanın teknik özellikleri	30
Şekil 23. Deneylerde kullanılan Anemometre (Hız ölçüm cihazı).	31

Şekil 24. a) Veri toplama cihazı. b) Isıl çift kaynak cihazı. c) Güç kaynağı.....	32
Şekil 25. a) Termal kamera ve b) termal görüntü.....	32
Şekil 26. Demir standın üzerine PV panel, çatı malzemesi ve projektörlerin yerleştirilmesi..	33
Şekil 27. a) PV panel alt yüzeyine yerleştirilen ısı çiftler b) akış doğrultusunda PV panel ve çatı malzemesi arasındaki boşluğun kapatılarak kanal formu oluşturulması c) alt yüzeye yerleştirilen ısı çiftlerin konumlarının şematik gösterimi.	34
Şekil 28. a) PV panel-çatı geometrisinin şematik gösterimi b) deneylerde kullanılan oluklu PVC çatı paneli fotoğrafı.....	35
Şekil 29. Projektörler ile PV panel arasındaki dikey mesafenin izole edildiği ortama ait görüntü.....	36
Şekil 30. Deney düzeneğinin son haline ait görsel.....	37
Şekil 31. Işınım şiddetinin iki farklı cihazla ölçümüne yönelik yapılan test a) Fluke FLK-IRR1-SOL elektronik ışıyım ölçüm cihazı ile okunan değer b) Hukseflux SR05-A1 Piranometre ile okunan değer.	38
Şekil 32. Deneysel çalışmaya konu PV panel-çatı sistemine ait şematik gösterimi.	42
Şekil 33. Sayısal çalışmaya konu olan hesaplama bölgesi, boyutları ve sınır koşullarının şematik gösterimi.....	45
Şekil 34. Geliştirilen simülasyon programının ürettiği sonuçların literatür verileri ile karşılaştırılması.....	48
Şekil 35. Geliştirilen simülasyon programının kabul edilebilir sonuçlar üretip üretmediğinin deneysel veriler ile test edilmesi. a) PV panel alt yüzey sıcaklığının zamanla değişimi b) Kanal çıkışında hava sıcaklığının zamanla değişimi c) PV panel alt yüzey sıcaklığının akışkan debisi ile değişimi.	51
Şekil 36. PV panel-çatı sisteminin sayısal çözüm eleman yapısı.....	53
Şekil 37. Etkisi incelenen sandviç çatı modelleri.....	55
Şekil 38. Hücre sıcaklığının artmasından kaynaklı a) elektriksel güç çıktısında ve b) elektriksel etkinlikte meydana gelen değişim.	57
Şekil 39. Rüzgar hızının PV sistemin a) elektriksel performansına b) ısı performansına olan etkisi.....	59
Şekil 40. Güneş ışıyım şiddetinin a) elektriksel ve b) ısı performansına olan etkisi.	61
Şekil 41. PV panel-çatı arasındaki mesafenin sabit akışkan hızında a) elektriksel ve b) ısı performansına olan etkisi.....	63
Şekil 42. a) 0,05 m ve b) 0,23 m kanal yüksekliklerinde PV panel- çatı sistemine ait sıcaklık dağılımı.	65
Şekil 43. a) 0,05 m ve b) 0,23 m kanal yüksekliklerinde akım çizgileri.	66

Şekil 44. PV panel-çatı arasındaki mesafenin, sabit akışkan kütleli debisinde a) elektriksel ve b) ısı performansa olan etkisi.....	67
Şekil 45. Farklı güneş ışıma şiddeti değerleri altında sandviç çatı geometrisinin PV panelin a) sıcaklığına b) elektriksel performansına etkisi.	69
Şekil 46. Farklı rüzgar hızlarında sandviç çatı geometrisinin PV panelin a) sıcaklığına b) elektriksel performansına etkisi.	70
Şekil 47. a) Düz, b) oluklu, c) trapez, d) Model A ve e) Model B sandviç çatı geometrilerine ait kanal girişindeki vektörel akış çizgileri.....	71
Şekil 48. Çatı hatve yüksekliğinin (H) a) PV panel sıcaklığına ve b) elektriksel performansına etkisi.	73
Şekil 49. Çatı hatve mesafesinin (W) a) PV panel sıcaklığına ve b) elektriksel performansına etkisi.	74

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A	PV panel yüzey alanı (m^2)
I	Akım (A)
V	Voltaj (V)
T	Sıcaklık ($^{\circ}C$)
G	PV panel yüzeyine uygulanan metre kare başına güneş ışıınım şiddeti (W/m^2)
Q	Isıl güç (W)
P	Elektriksel güç (W)
k	Isı iletim katsayısı (W/mK)
c_p	Sabit basınçta özgül ısı ($J/kg^{\circ}C$)
t	Kalınlık (mm)
h	Isı taşınım katsayısı (W/m^2K)
q	Isı akısı (W/m^2)
Re_{Dh}	Hidrolik çapa bağlı Reynolds Sayısı
D_h	Hidrolik çap (m)
H	Kanal yüksekliği (m)
W	Kanal genişliği (m)
$\dot{m}$	Kütlelel debi (kg/s)
T	Sıcaklık ($^{\circ}C$)
u	Akış hızı (m/s)
x,y,z	Kartezyen koordinatlar
n	Yüzey normali
ϵ	Yayıcılık
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
μ	Akışkan dinamik viskozitesi (kg/ms)
μ_T	Türbülans dinamik viskozitesi (kg/ms)
η	Etkinlik
Δ	Fark

Alt indisler

max	Maksimum
oc	Açık devre
sc	Kısa devre
a	Çevre

g	Cam
f	Akışkan
s	Katı
in	Giriş
out	Çıkış
sc	Solar hücre
ref	Referans
elk	Elektrik

Kısaltmalar

MPPT	Maximum power point tracking
PV/T	Fotovoltaik/thermal
PV	Fotovoltaik
CFD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

GİRİŞ

Son elli yılda nüfusun hızla artması, gelişen teknoloji ve daha konforlu bir yaşam arzusu nedeniyle enerjiye olan talep küresel çapta hızlı bir artış göstermiştir. Bu bağlamda bakıldığında enerji üretimi ekonomik ve teknolojik kalkınmanın en önemli göstergelerinden biridir.

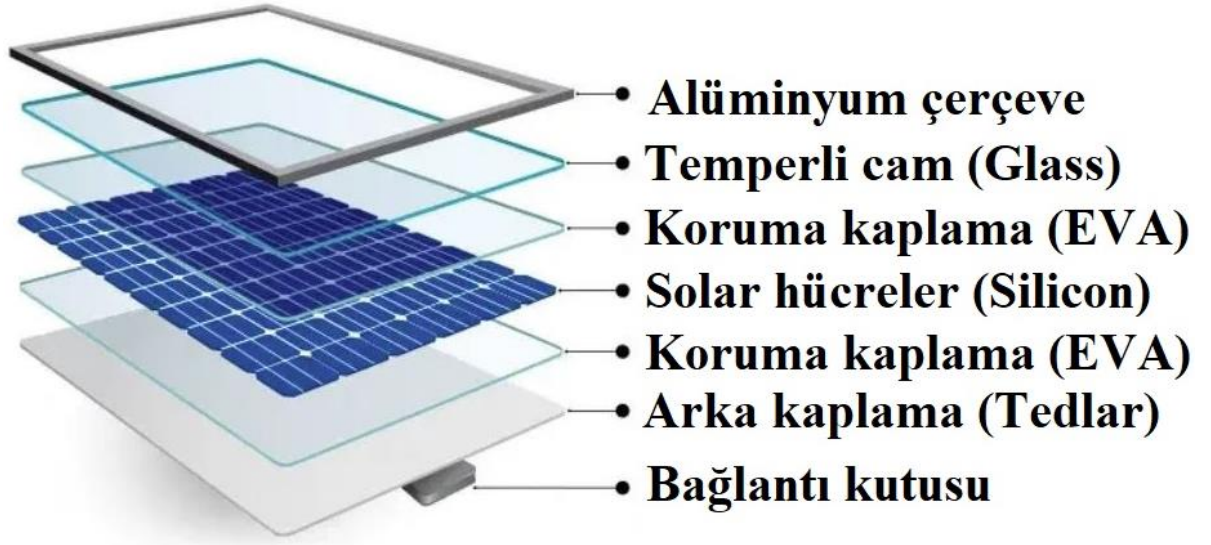
Dünyada ve ülkemizde yakın geçmişe kadar kullanıma sunulan elektrik enerjisinin büyük bir kısmı, fosil yakıtlar (kömür, doğalgaz ve petrol) ve nükleer enerji gibi tükenbilir ve çevre üzerinde olumsuz etkilere sahip enerji kaynakları kullanılarak üretilmekteydi. Ancak, çevresel kaygılar ve artan talep gözetildiğinde sınırlı ömre sahip bu kaynaklardan faydalanılarak günümüz elektrik enerjisi taleplerini sürdürülebilir bir şekilde karşılanması mümkün değildir. Ayrıca, fosil yakıtların yanmasından kaynaklı atmosfere büyük miktarlarda karbon salınımı gerçekleşmektedir. Salınan bu egzoz gazlarının küresel ısınmaya bağlı iklim değişikliğinin en önemli kaynağı oldukları rapor edilmiştir. Nükleer yakıtlar ise atmosfere karbon salınımına neden olmamakla birlikte atıklarının çevreye ve insan sağlığına ciddi zararlar söz konusu olabilmektedir. Dolayısıyla, bu risklerin ortaya çıkmaması için atıkların taşınması ve depolanmasına büyük özen gösterilmesi ve bütçe ayrılması gerekmektedir.

Rüzgar, güneş, hidrolik, jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıtların aksine çevre üzerine olumsuz etki yaratmayan, dünyamız var oldukça varlığını sürdürecektir enerji kaynaklarıdır. Bu kaynakların kullanımının yaygınlaşması ile beraber sera gazı emisyonlarının büyük ölçüde azaldığı literatürde rapor edilmiştir. (Maleki et al., 2020; Sharaf et al., 2022) Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı elektrik üretim tesislerinin işletme maliyetleri fosil kaynaklılara nazaran oldukça düşüktür. Diğer taraftan, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, ithalata dayalı enerji taleplerinin karşılanması noktasında hem ekonomik bakımdan dış bağımlılığın azaltılması hem de enerji arz güvenliğinin sağlanması bakımından büyük önem arz etmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında bulunan güneş enerjisi tüm enerji çeşitlerinin doğrudan veya dolaylı olarak temel kaynağıdır. Dünyanın güneşten aldığı yıllık enerji miktarına ve devamlılığına bakıldığında diğer tüm enerji kaynaklarına kıyaslanarak güneş enerjisi, en bol ve tükenmez bir temel enerji kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır. Buna ek olarak güneş enerjisi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılaştırıldığında erişim anlamında konumdan bağımsız ve süreklilik arz eden güvenli bir enerji kaynağıdır. Bu sebeplerden dolayı güneş enerjisinden maksimum düzeyde yararlanmak için yapılan çalışmalar son yirmi yılda hızlı bir artış göstermiştir. (Parida et al., 2011a; Sargunanathan et al., 2016a; Sopian et al., n.d.-a).

Güneşten gelen ısı ve ışık formundaki enerji, güneş kollektörleri vasıtasıyla termal uygulamalarda kullanıldığı gibi fotovoltaik (PV) paneller aracılığıyla da elektriksel güç üretimi uygulamalarında son yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Sharma, 2011a). Şekil 1’de gösterildiği üzere bu paneller temel olarak bağlantı kutusu, tedlar, EVA (Etilen-Vinil-Asetat), silikon solar hücreler ve temperli cam katmanlarının bir alüminyum çerçeve içerisinde bir araya getirilmesi ile oluşmaktadır.

Bahse konu PV panel sistemleri güneş ışınlarını elektriğe çeviren yarı iletken malzemelerden üretilen hücrelere sahiptirler (Mickey, n.d.; Shukla et al., 2017a). PV panel hücrelerinde yarı iletkenlerin kullanılmasının temel nedeni, yalıtkan ve iletken özelliklere sahip olmaları nedeniyle güneşten gelen belirli dalga boyundaki fotonları absorbe ederek sonrasında elektriğe dönüştürmeleridir. Bu hücrelerin üretiminde en bilinen ve yaygın olarak kullanılan yarı iletken, silikondur (Si) (Shaari et al., 2009a; Tiwari et al., 2016a). PV hücreler ticari ölçekte farklı üretim yöntemleri kullanılarak mono-kristal, poli-kristal ve ince film yapılarında üretilmektedirler (Adeeb et al., 2019). Temel olarak, üretim süreci saf silikon elde edilmesi ve bu silikonun ince plakalara (wafers) dönüştürülmesiyle başlar. Bu plakalar daha sonra güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürebilen pozitif (+) ve negatif (-) bağlantılar oluşturmak için işlenir ve yarı iletken malzeme elde edilmiş olur (Bayod-Rújula, 2019). Yarı iletken malzemeden üretilen PV hücrelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan PV panellerin farklı parametrelerin etkisi altında performanslarının incelendiği pek çok çalışma yapılmıştır. Siddiqui et al., (2016) sıcaklık ve nem kontrolü sağlanarak oluşturulan laboratuvar ortamında, farklı hücre yapılarına sahip PV modüller üzerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalar neticesinde en yüksek güç çıktısının mono-kristal hücre yapısına sahip PV modüllerden edildiğini göstermişlerdir. Buna benzer olarak (Baghdadi et al., 2018) Fas’ın Tetouan eyaletinde gerçekleştirdikleri çalışmada şebekeye bağlı (on-grid) bir deney sistemi kullanarak üç farklı PV modül teknolojisinin (amorf, mono-kristal ve poli-kristal) performansını karşılaştırılmalı analiz etmişlerdir. 2016 yılı boyunca elde edilen verim ve elektriksel güç çıktısı verilerine dayanarak mono-kristal yapıli modülün diğer PV teknolojiler ile karşılaştırıldığında daha fazla enerji ürettiğini gözlemlemişlerdir. Literatürde buna benzer çeşitli çalışmalar mevcuttur (Adaramola & Vågnes, 2015; Adeeb et al., 2019; Al-Otaibi et al., 2015).



Şekil 1. Fotovoltaik paneli bir araya getiren katmanların şematik gösterimi.

PV modüllerin standart laboratuvar koşullarında elde edilen etiket verim değerleri, sahada toz, nemlilik, ışınım açısı/yoğunluğu ve modül yüzey sıcaklığı gibi faktörlerden etkilenmektedir (Ali et al., 2017a; Katsumata et al., 2011a). PV hücreler, üzerlerine düşen güneş ışınlarının büyük bir kısmını absorbe etme kabiliyetine sahip olsalar da hücre teknolojisine bağlı olarak absorbe edilen bu enerjinin sadece %25’lik bir kısmı elektriksel güce dönüşebilmektedir (Akhter et al., 2024; Villegas-Mier et al., 2021). Geriye kalan kısmı panel üzerinde istenmeyen ısıya dönüşür ve panelin yüzey sıcaklığını yükseltir. Panel yüzey sıcaklığındaki artış, hücrelerdeki serbest elektronların hareketine karşı bir direnç oluşturarak elektriksel güç dönüşüm verimliliğinin azalmasına neden olur (Sharaf et al., 2022a). Yüzey sıcaklığının 25 °C’nin üzerindeki her 1 °C’lik artışı elektriksel güç verimliliğini yaklaşık olarak %0,5 oranında azaltır (Darussalam et al., 2024; Zhu et al., 2015). Aynı zamanda yüksek çalışma sıcaklıkları silikon solar hücrelerde bölgesel sıcak noktalar (hot spot) oluşmasına sebep olabilir ve böylece çeşitli bozulma mekanizmalarını harekete geçirerek PV panelin güç performansını düşürebilir. Çatıya monte edilen PV paneller bu durumdan daha fazla etkilenir ve yere monte edilen panellere kıyasla daha hızlı bir bozulma durumu yaşanması eğilimindedir (Ali et al., 2024). Teorik olarak bakıldığında bir PV panelin elektriksel güç verimliliği, PV panelden elde edilen elektriksel gücün, panelin yüzey alanına gelen güneş ışınımına oranı olarak tanımlanır (Pathak et al., 2022). Bu tanım kapsamında Rehman ve El-Amin, 2012 tarafından yapılan çalışmada PV panel performansının, panel yüzey sıcaklığı ile olan ilişkisi incelenmiştir. Suudi Arabistan’ın Dahran kentinde yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen güç çıktılarına bakıldığında PV panel yüzey sıcaklığının artmasıyla saatlik ve günlük ortalama panel güç verimliliğinin azaldığı tespit edilmiştir.

Ancak bununla beraber ısındıkça verimleri düşen bu hücrelerin su veya hava gibi akışkanlar kullanılarak aktif bir soğutma uygulamasıyla soğutulması ve bu sayede PV panel elektriksel verimliliği arttırılırken aynı zamanda hücrelerden alınan ısı enerjinin başka uygulamalarda kullanılması da mümkündür. Bu tarz uygulamalar fotovoltaik-termal (PV/T) sistemler olarak adlandırılır (Sharaf et al., 2022a). Bu amaç doğrultusunda Ozgoren et al., (2013) tarafından deneysel olarak yürütülen çalışmada PV panel arka yüzeyinde, içerisinde soğutma suyu geçirilen borular kullanılarak solar hücrelerin soğutulması ve bu sayede PV panellerin elektriksel verimliliğinin arttırılması hedeflenmiştir. Yapılan aktif soğutma işlemiyle beraber PV panel elektriksel verimliliğinin %8 değerinden %13,6 değerine yükseldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, soğutucu akışkan vasıtasıyla PV panellerden çekilen ısıнын farklı termal uygulamalarda kullanılabileceği ifade edilmiştir. Benzer şekilde Teo et al., (2012) PV panelin arka yüzeyi üzerine yerleştirilen hava kanalları içerisinde dış ortam havasını dolaştırarak panelin soğutulmasına yönelik deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada deneysel ortamda 68 °C sıcaklıkta %9 verimle çalıştırılan PV panellerin bahse konu yöntemle soğutulması yüzey sıcaklığının 38 °C sıcaklığa düşürülmesi sağlanmıştır. Bu sayede PV panel elektriksel verimliliğinin %14 değerlerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Binaların veya iş yerlerinin çatıları bu tarz bir yapının güneş ışınlarına en yüksek seviyede maruz kalan temel kısımlarıdır. Bu anlamda literatüre bakıldığında çatı yapısının PV panel verimliliğine olan etkisini inceleyen birkaç çalışma yapılmıştır. Lee et al., (2009) laboratuvar ortamında kurdukları deney düzeneğinde birkaç katmandan oluşan bir çatı modellemesi geliştirmişlerdir. Bahse konu çalışma kapsamında ışıma maruz kalan bir dış panel ve iç katmanda bulunan çatı malzemesi arasında bir boşluk oluşturulmuş ve buradan bir hava akışı geçirilerek ısı izolasyonu sağlanması hedeflenmiştir. Ayrıca yapılan deneysel çalışmada çatının eğimi, güneş radyasyon yoğunluğu, dış panel ve çatı arası boşluk yüksekliği ve çatı profillerinin geometrisi incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda çatı açısı ve çatı profil geometrisi değiştirilerek yoğun güneş ışıması tarafından sebep olunan yüksek sıcaklıklara karşı izolasyon veriminin arttırılacağı ve bu sayede binaların ve iş yerlerinin soğutma maliyetlerinin azaltılabileceği ön görülmüştür.

Çatılara yerleştirilen PV paneller ile çatı profili arasındaki mesafeden ve çatı profil geometrilerinden kaynaklı PV panel verimlerinde yaşanan kayıplar şimdiye kadar sınırlı sayıda çalışmaya konu olmuştur. Bu tez çalışmasında çatıya yerleştirilen PV paneller için panel veriminin çatı profil geometrisi ve PV panel-çatı arası mesafe gibi faktörlerden etkilendiği öngörülerek yapılacak deneysel ve sayısal çalışmalar ile uygun çatı-panel tasarım parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu değerlendirmeler ışığında tez çalışması kapsamında laboratuvar ortamında PV panel elektriksel güç çıkışı analiz sistemi kurulmuştur. Bahse konu PV panel, çatılarda yaygın olarak kullanılan oluklu geometriye sahip sandviç çatı

üzerine monte edilmiştir. Bu şartlar altında PV panel ön yüzeyine çarpan belirli bir ışıınım değeri ve belirli bir mesafede oluşturulan panel-çatı arasındaki boşluktan geçen hava akışı şartları altında elde edilen elektriksel güç çıktısı, elektriksel verim, PV panel yüzey sıcaklığı ve termal verim değerleri deneysel olarak hesaplanmıştır. COMSOL Multiphysics CFD analiz programı yardımıyla da 2D ve 3D modellemeler yapılarak elde edilen hesaplamalar doğrulanmış ve farklı geometrilerdeki sandviç çatı modellerinde, farklı panel-çatı arası mesafe değerlerinde, farklı ışıınım yoğunluklarında ve farklı hava akış hızı değerlerinde parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın asıl amacı, çatılara yerleştirilen PV panellerin elektriksel performansı için farklı parametreler karşılaştırılarak uzun vadeli bir fayda sağlayabilmektir.

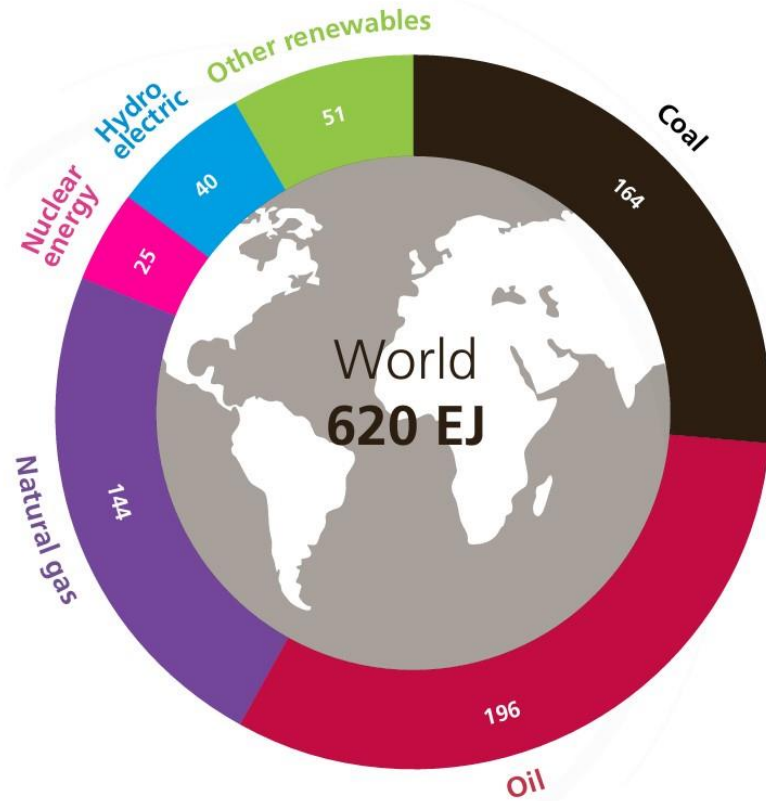


KURAMSAL TEMELLER

Global Ölçekte Kullanılan Enerji Dağılımı

Son elli yılda dünya nüfusunun hızlı bir artış göstermesi, gelişen teknoloji ve sanayileşme ile birlikte daha konforlu bir yaşam arzusuyla, elektrik ihtiyacına olan talep giderek artmaktadır. Genel anlamda bakıldığında bu enerji ihtiyacını karşılayabilmek adına kömür, doğalgaz ve petrol gibi fosil yakıtlar, nükleer enerji ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmaktadır.

2023 yılı sonu itibarıyla global ölçekte dünyanın toplam enerji tüketimi yaklaşık 620 exajoules olup (Şekil 2) dünyanın hızla büyüyen endüstriyel üretim altyapısı, kentleşme ve nüfus artış hızı, 2013-2023 yılları arasındaki son 10 yılda toplam enerji tüketiminde 82,15 exajoules ile %15,2'lik bir artışa neden olmuştur. 2023 yılı itibarıyla kullanılan kaynakların bu tüketimdeki payları ise %31,6 ham petrol, %26,4 kömür, %23,2 doğal gaz, %6,4 hidrolik, %4,0 nükleer ve %8,2 yenilenebilir enerji (güneş, rüzgar, jeotermal vb.) şeklindedir (Energy Institute, 2023). Bu bağlamda global ölçekte bakıldığında enerji üretiminde kullanılan fosil yakıtlar tüketilen kaynakların büyük bir bölümünü oluşturmaktadır ve bununla beraber ülkelerin izlediği mevcut politikalara göre fosil yakıtlara yönelik küresel talep 2050 yılına kadar azalmayacaktır (IEA, 2021).



Şekil 2. 2023 yılı sonu itibarıyla global ölçekte kaynaklara göre enerji tüketimi dağılımı (Energy Institute, 2023)

Petrol, doğal gaz ve kömür gibi fosil yakıtlar, milyonlarca yıl boyunca yeraltında kalan bitkiler, hayvanlar, deniz canlıları ve mikroorganizmalar gibi organik maddelerin basınç ve sıcaklık altında çürüyerek enerji açısından zengin maddelere dönüşmesiyle oluşur. Tüketime sunulan elektrik enerjisinin büyük bir kısmı tükenebilir olan bu kaynakların kullanımı ile üretilmektedir.

Ancak bununla beraber fosil yakıtların yanması sonucunda atmosfere sera gazları salınır ve bu da çevre kirliliğine ve iklim değişikliğine neden olan sebeplerin başında gelmektedir. Ayrıca, fosil yakıtlardan kaynaklanan hava kirliliği solunum yolu hastalıklarına ve kalp ve damar yolu rahatsızlıklarına yol açabileceği gibi yakın zamanda nörolojik problemlere de sebep olabileceği kanıtlanmıştır (Kotcher et al., 2019). Bunun yanında fosil yakıt tüketimine dayalı bir enerji politikası özellikle bu kaynakları ithal eden ülkeler için enerjide dışa bağımlılık, ekonomik gelir-gider dengesizliği ve güvenlik gibi çeşitli riskler barındırmaktadır. Enerji arzındaki kesintiler, fiyat dalgalanmalarına ve siyasi ve jeopolitik gerilimlere neden olabilecek başlıca unsurlar arasındadır.

Fosil yakıtların sınırlı ömre sahip tükenebilir kaynaklar olmaları, çevre üzerinde olumsuz etkiler yaratmaları ve enerjide dışa bağımlılığı arttırmaları nedeniyle bu kaynaklara dayalı elektrik enerjisi üretiminin sürdürülebilir bir çözüm olmadığı düşünülmektedir.

Yenilenebilir Enerji Kaynakları

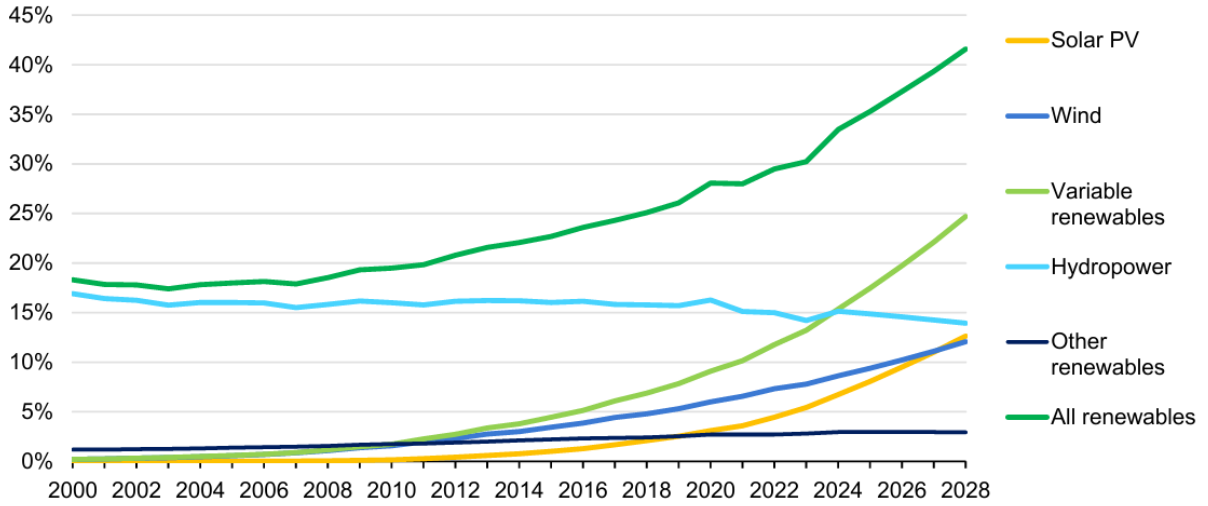
Fosil yakıtların çıkarılması, taşınması ve yakılması, hava ve su kirliliğine yol açarak ekosistemlerin tahribatına sebep olmaktadır. Fosil yakıtların yanması sonucunda atmosfere salınan karbon dioksit (CO₂) ve diğer sera gazlarının sebep olduğu iklim değişikliği ve küresel ısınmanın önüne geçebilmek adına yapılan çalışmalar dünya çapında en önemli konulardan biri haline gelmektedir. İklim değişikliğiyle mücadele etmek amacıyla 195 ülke tarafından imzalanan Paris Anlaşması küresel sıcaklık artışını 2°C'nin altında tutmayı hedeflemektedir (Plakitkina et al., 2021). Bu anlaşma ve benzeri politikalar, ülkelerin fosil yakıt kullanımını azaltmasını zorunlu hale getirmiş ve bu kapsamda birçok devlet ve şirketler karbon emisyonlarını sıfıra indirme hedeflerini belirlemişlerdir. Ancak bununla beraber artan nüfus, kentleşme ve endüstriyel faaliyetler nedeniyle dünya genelinde toplam enerji tüketiminde büyük bir artış meydana gelmektedir. 2023 yılı sonu itibarıyla bir önceki yıla oranla %2, son on yıl içerisinde ise %15,2'lik bir artış yaşanmıştır (Energy Institute, 2023).

Enerjiye olan ihtiyacı karşılayabilme açısından sınırlı olmaları, tükenebilir kaynaklar olmaları, çevre üzerinde olumsuz etkilere sebep olmaları ve enerjide dışa bağımlılığı arttırmaları nedeniyle fosil yakıtlara olan talep giderek azalmaktadır. Son yıllarda enerji

tüketiminin artması ve kaynakların azalması nedeniyle artan enerji maliyetleri de göz önünde bulundurulduğunda yenilenebilir enerji kaynakları dünya çapında önemli birer alternatif haline gelmiştir.

Yenilenebilir enerji kaynakları, hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirlik açısından büyük bir öneme sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynakları fosil yakıtlar gibi karbondioksit ve diğer herhangi bir sera gazı salınımına sebep olmazlar. Bu durum küresel ısınma ve iklim değişikliğine karşı mücadelede önemli bir avantaj sağlar. Ayrıca çevreye zarar veren madencilik, sondaj ve yakıt çıkarma işlemlerini gerektirmezler. Bu sayede doğanın ve ekosistemlerin tahrip edilmesinin önüne geçilmiş olur. Yenilenebilir enerji kaynakları doğal olarak sürekli yenilenir ve tükenmezler. Bu durum bu kaynaklarının sürdürülebilir olmasını sağlar ve gelecek nesiller için de güvenilir bir enerji kaynağı oluşturur. Ayrıca son yıllarda yaşanan yenilenebilir enerji teknolojilerindeki ilerlemeler, enerji üretim maliyetlerini düşürmüş ve enerji verimliliğini artırmıştır. Bunun yanında yerel ve coğrafi olarak nispeten homojen dağıtılmış kaynaklar olan yenilenebilir enerji kaynakları, bir ülkenin enerjide bağımsızlığını ve güvenliğini önemli şekilde arttırmaktadır. Fosil yakıt ithalatını azaltan yenilenebilir enerji kaynakları bir ülkenin ödemeler dengesini güçlendirir. Ayrıca, fosil yakıtların değişken fiyatlarının aksine ithalatçı ülkelerin üzerinde hiçbir kontrolünün olmadığı yenilenebilir enerji kaynakları sayesinde elektrik üretimini daha az bağımlı hale getirerek elektrik piyasalarındaki fiyat istikrarını sağlayabilir (World Economic Forum, 2013). Bu bağlamda bakıldığında fosil yakıt kaynaklarının sınırlı rezervlerine erişim konusunda jeopolitik gerilimlerin yaşandığı bir dünyada enerji güvenliği ve fiyat istikrarı bakımında yenilenebilir enerji, politika yapıcılar için giderek daha da önemli bir konu haline gelmektedir.

Yenilenebilir enerji, doğanın kendiliğinden yenileyebildiği, tükenme riski taşımayan ve sürekli olarak kullanılabilen enerji kaynaklarına dayalı enerji üretim biçimidir. Bu kaynaklar arasında güneş, rüzgar, hidroelektrik, jeotermal ve biyokütle bulunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları ile enerji üretim sürecinde sınırsız ve sürekli bir kaynağa dayanarak, uzun vadede hem ekolojik dengeyi korumak hem de enerji güvenliğini arttırmak hedeflenmektedir. Güneş panelleri ve rüzgâr türbinleri gibi teknolojiler, bu kaynaklardan elde edilen enerjiyi günlük yaşantımıza entegre etmemize olanak tanır. IEA verilerine göre yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı elektrik üretimi küresel ölçekte son yirmi yılda hızlı bir artış göstermiştir (International Energy Agency, 2020). Bugünkü verilerden hareketle 2028 yılı için yapılan bir öngörude; diğer yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında toplam elektrik enerjisi üretimi içerisinde en büyük paya güneş enerjisinin sahip olacağı ifade edilmiştir (Şekil 3).

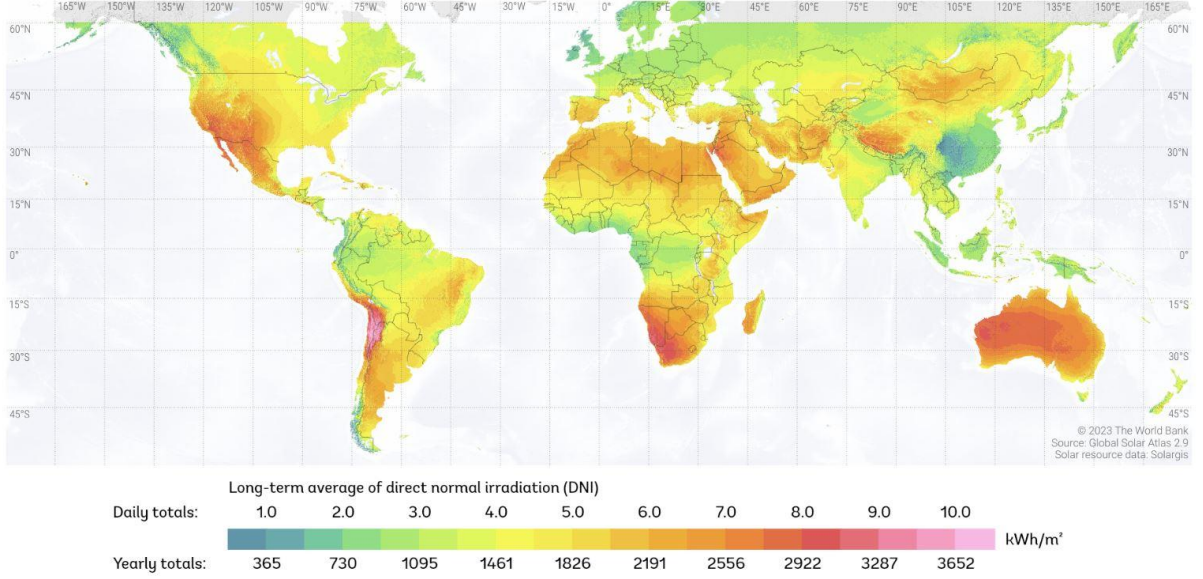


Şekil 3. 2000-2028 yılları arasında elektrik enerjisi üretimi amacıyla global ölçekte kullanılan ve kullanılacağı ön görülen yenilenebilir enerji kaynakları dağılımı (International Energy Agency, 2020)

Güneş Enerjisi

Dünyanın güneşten aldığı yaklaşık $1,8 \cdot 10^{11}$ MW değerindeki enerji, kullanılan diğer tüm enerji kaynaklarının sağladığı toplam enerjiden yüzlerce kat daha fazladır. Bu sayede güneş enerjisi bol ve tükenmez temel enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir (Parida et al., 2011; Sopian et al., 2000; Sargunanathan et al., 2016). Buna ek olarak güneş enerjisi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla her yerde bulunabilir ve öngörülebilir bir enerji kaynağıdır. Ayrıca güneş enerjisi sistemleri gürültüsüz çalışması bakımından da daha çekicidir. Yenilenebilir enerji kaynakları yeşil ya da temiz enerji olarak adlandırılrsa da tarımsal, çevresel ve biyoçeşitlilik anlamında olumsuz etkileri olduğu öne sürülebilmektedir. Ancak bununla beraber hidrolik ve rüzgar enerjilerine kıyasla güneş enerjisini kullanan sistemlerin bu tarz etkileri daha düşük seviyelerdedir (De Franco, 2008). İlk yatırım maliyetleri yüksek olsa da hidrolik enerji ve rüzgar enerjisine kıyasla tasarım ve kurulum bakımından maliyet etkin bir teknolojidir. Ayrıca ABD Enerji Bilgi İdaresi (EIA) tarafından sunulan bir rapora göre güneş enerjisi sistemlerinin işletme maliyetleri yakın gelecekte düşmeye devam edecek ve 2025 yılı itibarıyla diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla en düşük seviyelere ulaşacaktır (Maleki et al., 2020). PV panellerinin üretim maliyetinin son yıllarda önemli ölçüde düşmesinin yanında PV hücrelerinin verimliliği de giderek artmaktadır. Bu da PV sistemlerin daha düşük maliyetle daha fazla elektriksel güç üretebileceği anlamına gelmektedir. PV sistemlerin kurulum alanı seçenekleri arasında araziler, çatılar ve hatta su yüzeyi bulunmaktadır. Bu anlamda bakıldığında sadece düşük maliyetli ve enerji etkin değil aynı zamanda da diğer yenilenebilir enerji sistemlerine kıyasla inanılmaz derecede uyarlanabilir bir teknolojidir (Sarang et al., 2024). Bununla beraber hareketli parçalarının olmaması, bakım maliyetinin düşük oluşu, kullanıcı

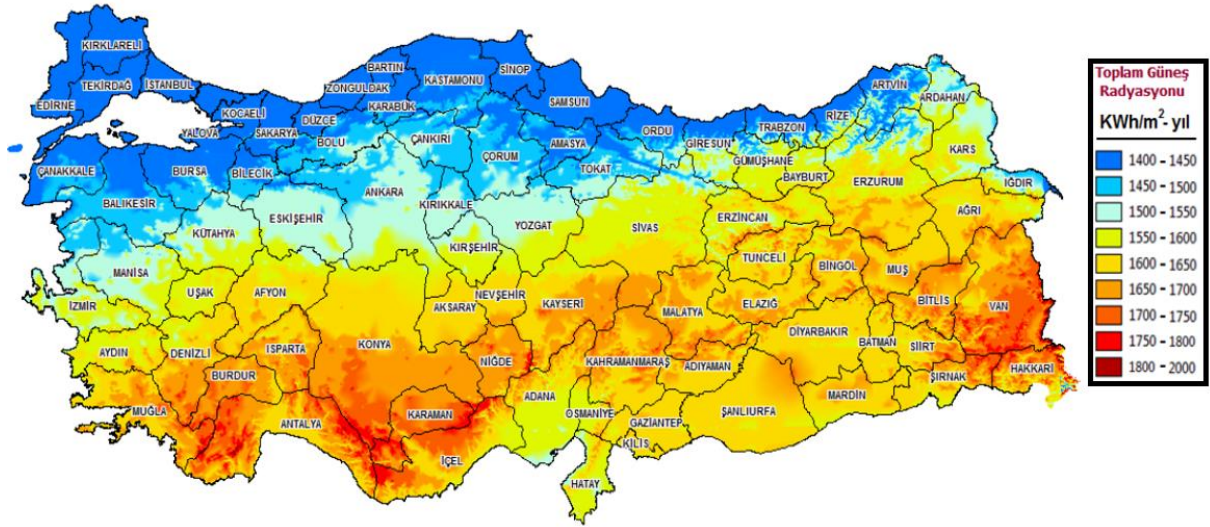
dostu oluşu ve üretilen enerjinin ilave sistemler gerektirmeyecek bir şekilde direk olarak kullanılabilir olması gibi avantajları sayesinde yenilenebilir enerji kaynakları arasında popülerliği gün geçtikçe artmaktadır (Demir 2024). Yukarıda bahsedilen üstünlükleri nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi daha tercih edilebilir bir enerji kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 4. Dünya üzerine dik açıyla düşen yıllık ortalama güneş radyasyonu (GLOBAL SOLAR ATLAS, 2023)

Dünya üzerine düşen güneş enerjisinin yoğunluğu güneşin toplam ışıyım gücünün sadece küçük bir kısmını oluşturur. Dünyanın güneşe olan uzaklığı yaklaşık olarak $1,495 \cdot 10^{11}$ metredir. Bu mesafeden dolayı dünya atmosferine düşen güneş ışıyım şiddeti sabit bir değer alır. Bu değere güneş sabiti (solar constant) denilmektedir. G_{sc} ile gösterilen bu sabit dünyanın atmosferinin dışına birim zamanda, birim yüzey alanına dik olarak düşen güneş radyasyonunun ortalama miktarını ifade eder. Değeri yaklaşık 1367 W/m^2 olarak kabul edilmektedir (Duffie and Beckman, 1980). Güneş sabiti, dünyanın atmosferi dışında ölçüldüğü için bu enerjinin bir kısmı atmosferden yansır, bir kısmı emilir veya saçılır ve dünya yüzeyine ulaşan enerji miktarı değişiklik göstermektedir. Aynı zamanda belirli bir bölgenin veya ülkenin güneş radyasyonu miktarı, coğrafi konum, iklim, mevsim veya yerel hava koşullarına bağlı olarak da önemli ölçüde farklılıklar gösterebilir (Şekil 4).

Türkiye özelinde bakılacak olursa ülkemiz coğrafi konumu nedeniyle önemli bir güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA) 2022 yılı verilerine göre, yıllık ortalama toplam güneşlenme süresi 2741 saat olup yıllık ortalama toplam ışıyım (radyasyon) değeri ise 1527 kWh/m^2 olarak hesaplanmıştır (Şekil 5). Ülkemizdeki farklı iklim bölgeleri, alınan güneş radyasyonu bakımından farklılıklar gösterebilmektedir.



Şekil 5. 2022 yılı boyunca Türkiye üzerine dik açıyla düşen toplam güneş radyasyonu (GEPA, 2022)

Güneşten alınan ısı enerjisi güneş kolektörleri vasıtasıyla termal uygulamalarda kullanılabildiği gibi güneşten gelen ışık formundaki enerji (foton) ise fotovoltaik (PV) sistemler aracılığıyla elektriksel güç kaynağı olarak kullanılabilir (Sharma, 2011b). Kısaca PV hücreler üzerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine çeviren yarı iletken malzemelerdir. Bu teknolojiler yıllar içerisinde gelişmeye devam ettikçe elde edilen elektriksel güç ve enerji verimliliği giderek artmaktadır.

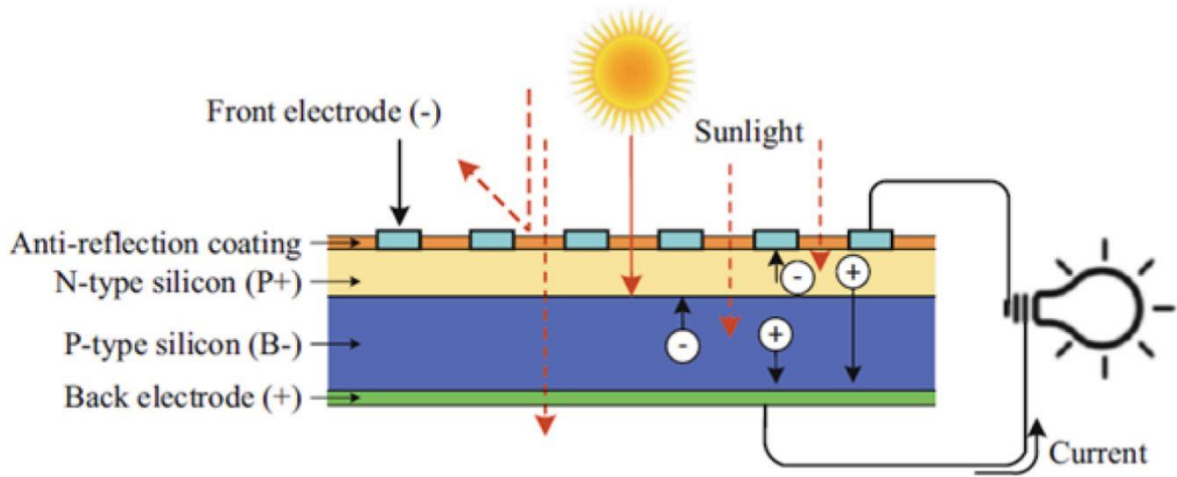
PV Panel Vasıtasıyla Elektrik Üretimi

PV paneller, güneş radyasyonu ile gelen fotonların panel yüzeyine düşmesiyle beraber elektrik enerjisi üretebilen bir enerji sistemidir. Bu paneller genellikle silikon gibi yarı iletken malzemelerden üretilen PV hücrelerin bir araya getirilmesiyle üretilirler (Mickey, n.d.; Shukla et al., 2017b). Güneşten gelen ışık, PV hücrelere çarptığında, hücre içinde bulunan silikon atomlarındaki elektronları uyararak serbest kalmalarını sağlar. Serbest bırakılan elektronlar, PV hücre içindeki elektriksel alanı geçer. Bu elektriksel alan, bir tarafının pozitif (+), diğer tarafının negatif (-) yüklü olduğu bir yapıdır. Bu nedenle elektronlar Şekil 6'da gösterildiği gibi bu elektriksel alan içinde belirli bir yönde hareket ederler. Elektronların hareketi, devre içinde bir akım oluşturur. PV hücrelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan PV panellerbu elektrik akımını toplar ve doğru akım (DC) elektriğine dönüştürür (Bilen & Erdoğan, 2023). Oluşan elektrik akımı bir invertör aracılığıyla ev elektroniği ile uyumlu alternatif akıma (AC) dönüştürülerek evde kullanılabilir veya bir batarya sistemine depolanabilir. PV paneller, temiz ve sürdürülebilir bir güneş-elektrik enerjisi dönüşüm teknolojisi olmakla birlikte özellikle

şebeke altyapısının olmadığı kırsal alanlarda elektrik enerjisi talebinin karşılanması noktasında yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

PV hücreler ticari ölçekte farklı üretim yöntemleri kullanılarak mono-kristal, poli-kristal ve ince film yapılarında üretilmektedirler (Bayod-Rújula, 2019). Mono-kristal PV hücreler, tek bir silikon kristalinden üretilirken poli-kristal PV hücreler birlikte eritilmiş birçok silikon kristalinin bir araya getirilmesiyle üretilirler. Bununla beraber kadmium tellür (CdTe), bakır-indiyum-galyum-selenyum (CIGS) gibi malzemelerden elde edilen çeşitli PV güneş paneli sistemleri de bulunmaktadır (Kumar & Balakrishna, 2024). Ayrıca son yıllarda popülerliği artan bir diğer PV panel teknolojisi ise perovskite hücrelerdir. Perovskite hücrelerin hammaddesi ucuz ve fabrikasyonları kolay olmakla beraber panel üretim maliyetleri ve dolayısıyla başlangıç yatırımı geri dönüş süreleri yüksektir (Sarkın, 2022).

Literatüre bakıldığında bu teknolojilerin performansına yönelik birçok farklı çalışmanın mevcut olduğu görülmektedir (Allouhi et al., 2016; Tiwari et al., 2016b, El-Bardawil et al. 2025). Siddiqui vd. (2016) sıcaklık ve nem kontrolü sağlanarak oluşturulan laboratuvar ortamında farklı PV modüller kullanarak gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada en yüksek güç çıktısının mono-kristal yapılardan elde edildiğini göstermişlerdir. Buna benzer olarak Baghdadi vd. (2018) Fas'ın Tetouan eyaletinde gerçekleştirdikleri çalışmada şebekeye bağlı (on-grid) bir PV sistem kullanarak üç farklı PV teknolojinin karşılaştırılmalı performans analizini gerçekleştirmiş ve mono-kristal yapıları modülün diğer PV teknolojiler ile karşılaştırıldığında daha fazla enerji ürettiğini gözlemlemişlerdir.

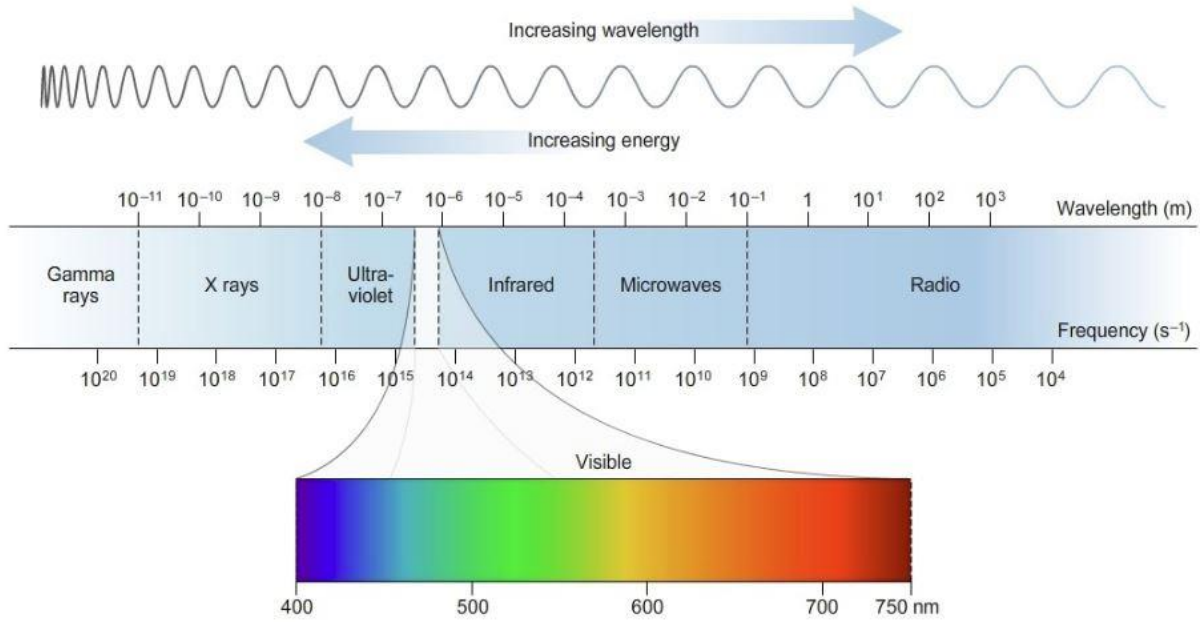


Şekil 6. PV hücrelerin çalışma prensibi (Jieb vd. 2022)

PV teknolojisi ile güneş ışığından etkin bir şekilde elektrik üretebilmek için, PV güneş panellerinin üretiminde kullanılan yarı iletken malzemelerin güneş ışığını absorbe edebilme kabiliyetlerinin iyi olması gerekmektedir. Güneş ışığı çoğunlukla yer yüzüne Şekil 7'de

gösterilen güneş spektrumunun görünür ışık ve kızılötesi aralığına düşmektedir (Kanti et al., 2024). Bu nedenle PV paneller spektrumun özellikle görünür ışık ve yakın kızılötesi bölgelerindeki güneş ışığından elektrik üretmek için optimize edilmektedirler.

PV hücreler, yüzeylerine gelen güneş radyasyonunun görünür ışık dalga boyundaki fotonlarını etkili bir şekilde absorbe ederek elektriğe dönüştürürken ultraviyole veya mikrodalga gibi diğer dalga boylarındaki fotonlar ise ısı enerjisiye dönüşür (Salihi et al., 2024). Bu durumun temel nedeni görünür ışık ve yakın kızılötesi dışında kalan dalga boylarındaki foton enerjisinin, PV panellerin yarı iletken malzemesi tarafından absorbe edilerek atomları uyaramaması veya bu enerjinin verimli bir şekilde kullanılamamasından kaynaklanmaktadır. PV panel yüzey sıcaklığının yükselmesi PV hücrelerin elektriksel verimliliğini düşürür. Bununla beraber toz nemlilik oranı, ışıınım açısı ve şiddeti gibi diğer dış etkenler de PV hücrelerin elektriksel verimliliğine etki eden temel faktörler arasında sayılabilir (Ali et al., 2017b; Katsumata et al., 2011b). Bu bağlamda bakıldığında PV teknolojisi ile enerjinin üretilmesinin yanı sıra PV panel elektriksel verimliliğinin artırılması da büyük önem arz etmektedir.



Şekil 7. Güneş spektrumu (Anonim 2023a).

Elektriksel Verim Arttırma Yöntemleri

PV panellerin yüzey sıcaklığının artması hücrelerde elektronların hareketini önleyici bir direnç oluşturur. Bu da hücrenin elektriksel verimliliğini düşürür (Sharaf et al., 2022b). Araştırmacılar tarafından, yüzey sıcaklığının artmasıyla oluşan bu direnci en düşük seviyelere indirerek PV hücrelerin verimliliğini arttırmayı hedefleyen pek çok çalışma yapılmıştır. PV

panellerden elde edilen elektriksel güç çıktısı ile panelin m^2 cinsinden toplam yüzey alanına gelen güneş radyasyonu arasındaki oran, PV hücrelerin elektriksel verimliliği olarak adlandırılır (Pathak et al., 2022). Bu kapsamda Rehman ve El-Amin tarafından yapılan çalışmada PV panel performansının, panel yüzey sıcaklığıyla olan ilişkisi incelenmiştir. Suudi Arabistan'ın Dahran kentinde yapılan deneysel çalışma boyunca PV panel yüzey sıcaklığının 35,8 ve 45 °C aralığında bir artış göstermesi ile beraber panellerden elde edilen elektriksel güç çıktılarına bakıldığında temmuz ve ağustos aylarında sırasıyla %9,5'den %7,5'e ve %10'dan %8'e bir azalma yaşandığı tespit edilmiştir (Rehman & El-Amin, 2012).

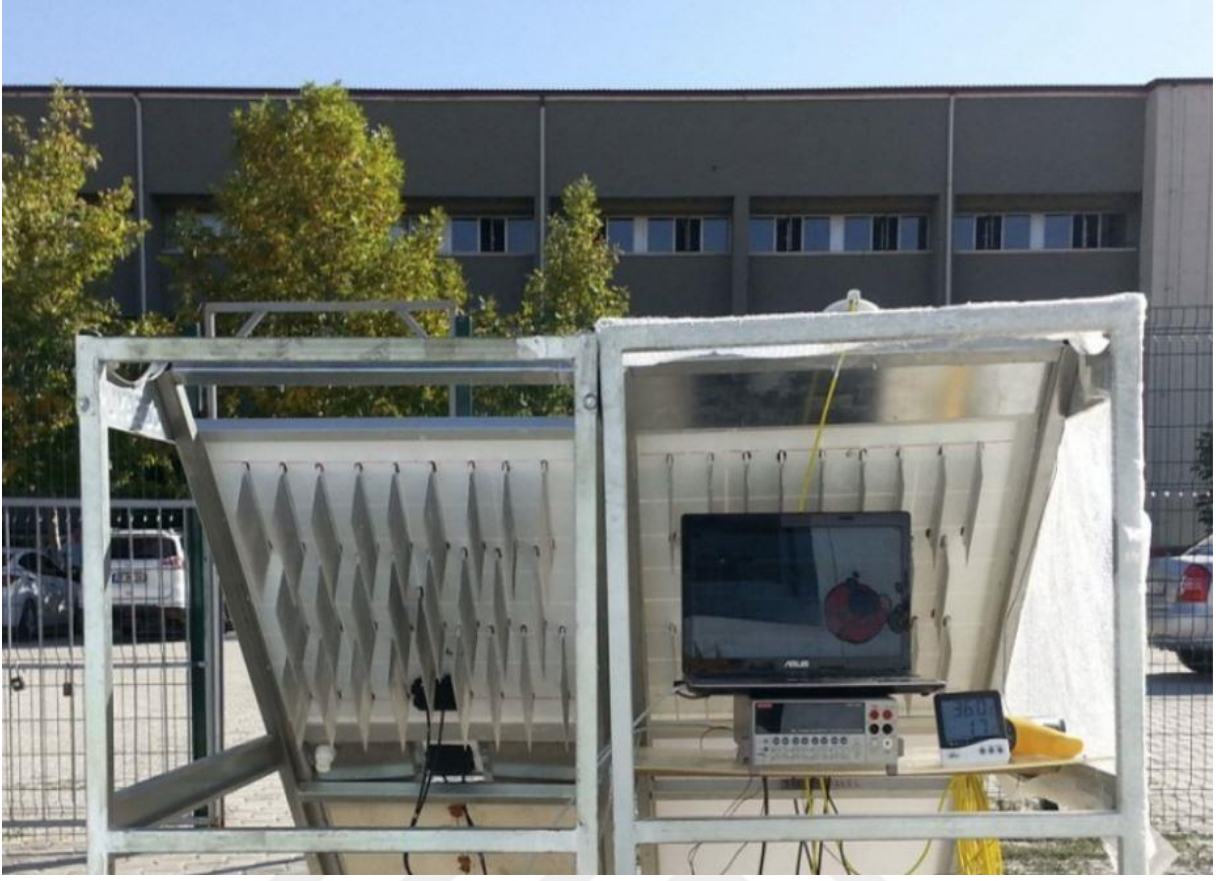
Özakın ve Kaya tarafından laboratuvar ortamında bir mono-kristal PV panelin arka yüzeyine hava kanalı yerleştirilerek içerisinden belirli miktarda kütleli debiye sahip hava akışı geçirilen bir PV/T sistem oluşturulmuştur. PV panelin soğutulmasına yönelik yürütülen deneysel çalışmada kullanılan hava akışı kütleli debisinin 0,0507 kg/s'den 0,065 kg/s'ye çıkarılması durumunda PV panel yüzey sıcaklığı düşürülerek elektriksel verimliliğin %8,91'den %9,44 değerlerine ulaştığı gözlemlenmiştir (Özakın & Kaya, 2020). Benzer şekilde Mazón-Hernández vd. tarafından deneysel olarak aynı yapısal özelliklere sahip iki PV sistem tasarlanmıştır. Bunlardan birinin alt yüzeyine bir hava kanalı montajı yapılarak sistem zorlanmış hava akışına maruz bırakılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda zorlanmış taşınım ile soğutulan panelin aktif bir soğutma yöntemi uygulanmayan duruma göre panel yüzey sıcaklığında 15 °C'lik bir azalma ve elektriksel güç çıktısında ise %15'e kadar bir artış yaşandığı rapor edilmiştir (Mazón-Hernández et al., 2013)



Şekil 8. PV hücrelerin hava akışkanını kullanılarak soğutulduğu aktif bir soğutma yöntemi (Mazón-Hernández et al., 2013).

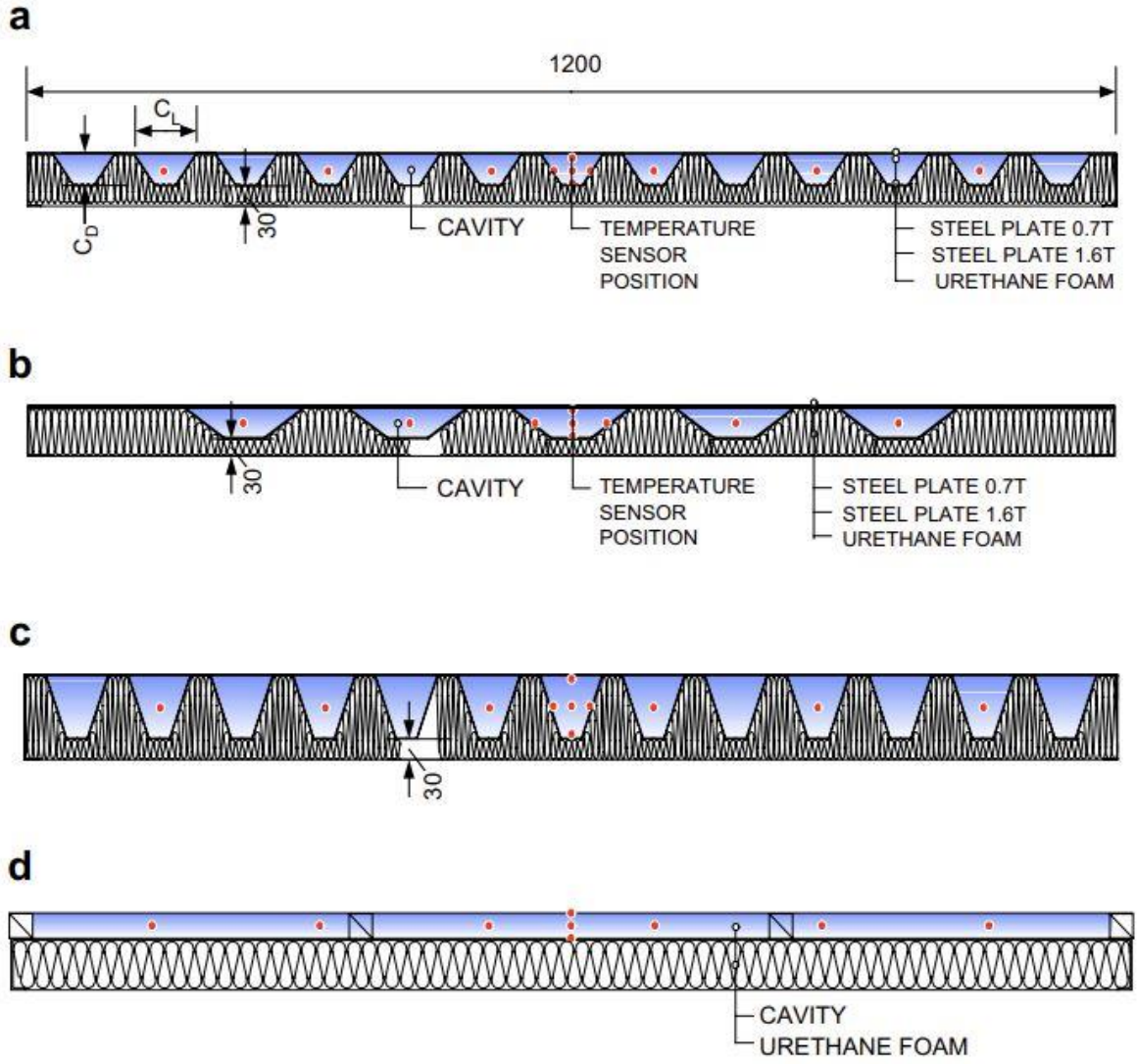
Yukarıda bahsedilen aktif yöntemlere ek olarak, su, hava veya faz değıştiren materyaller (FDM) gibi kimyasalları kullanarak geliştirilen ısı boruları, kanatçıklar veya ısı yayıcıları gibi pasif yaklaşımlar da PV sistemlerin termal yönetimi için literatürde farklı çalışmalara konu olmuştur (Sharaf et al., 2022). Pasif yöntemlerin aktif yöntemlere kıyasla avantajlı olduğu temel nokta, soğutma sistemini çalıştırmak için herhangi bir güç kaynağı veya dış müdahaleye ihtiyaç duymuyor olmalarıdır. Ayrıca daha basit yapılı olup düşük bakım maliyeti gerektirmektedirler (Maleki et al., 2020).

Açık literatürde, PV panellerin termal yönetimi için kanatçıklarveya metal köpük ile ısı transferi yüzey alanının artırıldığı yapılar, FDM ve ısı borusu gibi pasif soğutma teknikleri kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır. Hasan vd. alt yüzeyine çeşitli sayılarda (4, 6, 8 ve 10) açık hücreli metal köpük kanatçıklar yerleştirdikleri pasif soğutma tekniğı ile PV panellerin performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel bulgular neticesinde hücre sıcaklığının yaklaşık %8,4 oranında azaldığı ve elde edilen güç çıktısının da ay bazında ortalama %4,9 oranında arttığı gözlemlenmiştir (Jasim Hasan et al., 2019). PV panellerin termal yönetimi için kullanılan bir diğer pasif yaklaşım ise FDM kullanımıdır. Hasan vd. parafin bazlı 38 ile 43 °C aralığında erime sıcaklığına sahip FDM tabanlı bir PV panel tasarlamış ve deneysel çalışma için üretimini gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak FDM kullanımının sıcak iklim şartlarında elektrik üretiminde yıllık ortalama %5,9 oranında bir iyileştirme sağladığı gözlemlenmiştir (Hasan et al., 2017). Bayrak vd. alt yüzeyine çeşitli sayı ve dizilişte kanatçıklar yerleştirdikleri PV panellerin (Şekil 9) doğal taşınım sonucunda hücre sıcaklığında ve elektriksel güç çıktısındaki değişimi inceledikleri deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Yapılan çalışmada şaşırtılmış düzende ve en yüksek sayıda kanatçık bulunduran PV panel modeli için en düşük hücre sıcaklığına ve en yüksek elektriksel verim değerine ulaşılmıştır. Sonuç olarak PV hücre sıcaklığını 3,39 °C düşürerek elektriksel güç çıktısında 6,84 W değerinde bir artış elde edilmiştir (Bayrak et al., 2019).



Şekil 9. PV hücrelerin alüminyum kanatçıklar kullanılarak soğutulduğu pasif bir soğutma yöntemi (Bayrak et al., 2019)

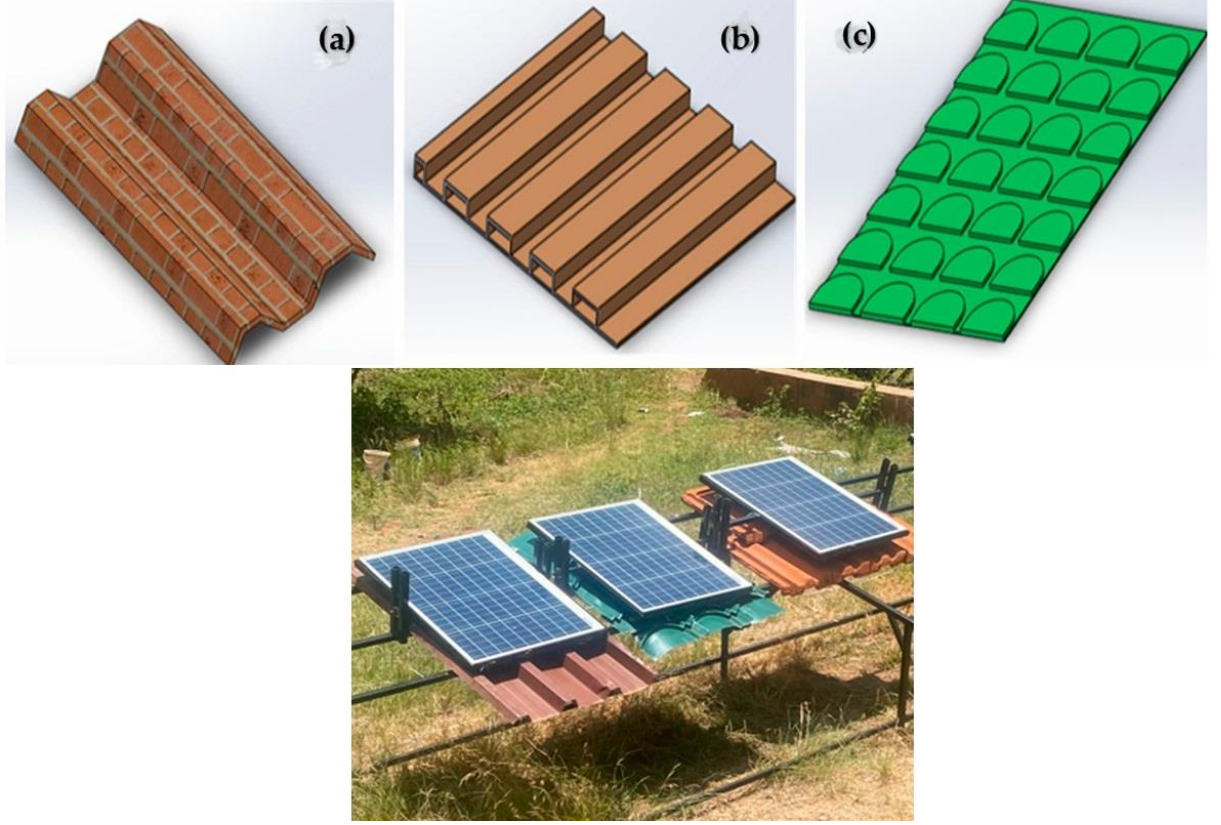
Çatı bir yapının güneş ışınlarına maruz kalan ve ısı koruma sağlayan temel bileşenidir. Literatürde, çatı yapılarının ısı konfor açısından incelendiği çatı uygulamalarına yönelik çeşitli çalışmalar bulunmaktadır (Jayasinghe et al., 2003). Lee vd. laboratuvar ortamında kurdukları deney düzeneğinde birkaç katmandan oluşan bir çatı modellemesi geliştirmişlerdir. Bahse konu çalışma kapsamında ışıma maruz kalan bir dış panel ve iç katmanda bulunan çatı malzemesi arasında bir boşluk oluşturarak ve buradan bir hava akışı geçirerek ısı izolasyon sağlamasını hedeflemişlerdir. Ayrıca yapılan çalışmada çatı eğimini, ışıma miktarını, dış panel ve çatı arası boşluk yüksekliğini ve çatı profil geometrisini deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda çatı açısı ve çatı profil geometrisi değiştirilerek yoğun güneş ışımasını sebebiyle bina içerisinde oluşan yüksek sıcaklıklara karşı izolasyon veriminin arttırılacağı ve bu sayede binaların ve iş yerlerinin soğutma maliyetlerinin azaltılabileceği ön görülmüştür (Lee et al., 2009).



Şekil 10. Çatı panel profilinin bir evin ısı izolasyon verimine olan etkisi incelenirken kullanılan farklı çatı panel profilleri (Lee et al., 2009)

Bununla birlikte, çatılar genellikle PV panel teknolojisinin kurulum alanı olarak kullanıldığından dolayı çatı profilleri ile PV paneller arasındaki ilişki büyük bir öneme sahiptir. Bu ilişki, hem teknik hem de tasarım anlamında değerlendirilmesi gereken kritik unsurlar içermektedir. Bu kapsamda Aigbedion vd. yapmış oldukları çalışmada çeşitli çatı tipleri ve üzerlerine monte edilen PV paneller arasındaki ısı etkileşimi deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Yapılan çalışmada PV panellerin kiremit çatı üzerindeki performansı, şekil ve geometri bakımından farklılık gösteren kare trapez ve Orientile metal çatılar üzerindeki performansları ile karşılaştırılmıştır. COMSOL Multiphysics programı ile geliştirilen sayısal modelin simülasyon sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda PV panellerin maksimum açık devre gerilimleri kiremit çatı için 21,096 V, kare trapez metal çatı için 20,945 V ve Orientile metal çatı için ise 20,718 V olarak bulunmuştur. Bunun yanında çatılara monte edilen PV paneller için en yüksek sıcaklık değerleri kiremit çatı modelinde 47,68 °C kare trapez ve Orientile çatı modellerinde ise sırasıyla 49,91 °C ve 50,32 °C olarak

ölçülmüştür. Aynı malzemeden yapılan farklı geometrik yapılarıdaki kare trapez ve Orientile metal çatılar için maksimum PV panel sıcaklık farkı 0,41 °C olduğu görülmüştür. Tek bir PV panel üzerinde küçük bir etkiye sahip olsalar da bu sonuçların büyük bir PV panel dizisi oluşturulduğu takdirde önemli bir hale gelebileceğini çalışma ekibi tarafından öne sürülmüştür (Aigbedion et al., 2023).



Şekil 11. Üzerlerine monte edilen PV panellerle olan ısı etkileşimi incelenen çatı tipleri a) kiremit b) kare trapez c) Orientile (Aigbedion et al., 2023).

Isı yayıcıları, katı kanatlıklar veya metal köpük gibi yapılar kullanılarak ısı transfer yüzey alanını artırmak etkili bir pasif soğutma yöntemidir. Fakat doğal taşınım ile ısı transferini esas alan bu tarz pasif yöntemler yüksek sıcaklıkları ancak belirli bir seviyeye kadar indirebilirler. Soğutma uygulamalarında PV sistemlerdeki istenmeyen ısıyı uzaklaştırabilmek için büyük miktarlarda ısı yayıcılar/kanatlıklar gerekmektedir ve bu da onları daha az uygulanabilir ve cazip hale getirir (Sharaf et al., 2022). PV sistemleri pasif yöntemle soğutmak için FDM kullanımı da söz konusudur. Bu uygulamalarda katı haldeki FDM, sıcaklığı erime noktasına ulaşana kadar PV hücrede üretilen ısıyı çekerek (görünür ısı) PV hücreyi soğutur. Sonrasında FDM katı halden sıvı hale geçene kadar PV hücrede üretilen ısıya bir kısmını daha çekmeye (gizli ısı) devam eder. Gün boyunca PV hücreden çekilen ısıya bir sonucu olarak PV panel yüzey sıcaklığı azalır ve sonuç olarak PV panelden üretilen elektriksel güç artar. Daha sonra güneşin olmadığı zaman diliminde FDM tarafından çekilen ısı ortama aktarılır ve FDM'

nin sıcaklığı azalır. Bunun sonucunda FDM tekrar katı hale dönüşür. Sonrasında soğutma döngüsü ertesi sabah PV hücrelerin sıcaklığının yükselmesiyle yeniden başlar. Bu yöntemin ana faydası, diğer pasif yöntemlere kıyasla malzemenin gizli ısını kullanarak daha fazla ısı çekebilme ve bu sayede daha iyi ısıl yönetim sağlayabilme kabiliyetidir. Ancak bununla beraber FDM kullanımı diğer aktif ve pasif yöntemlere kıyasla daha yüksek maliyetler gerektirebilir. Ayrıca bazı FDM' ler yangın güvenliği sorunları yaşatmakla beraber korozyon etkileri ve insan sağlığına zararlı etmenler bulundurabilir. Kullanım ömrünü dolduran FDM' ler uygun geri dönüşüm veya atık yönetim sistemlerine dahil edilmediklerinde çevresel zararlara neden olabilirler (Shukla et al., 2017). Ayrıca aktif veya pasif uygulamalar ile panel soğutma çalışmaları hücre verimliliğinin yükseltilmesi açısından oldukça önemli olsa da bina ve saha uygulamalarında nadiren kullanılabilmekte ve uygulanabilirlik açısından ise laboratuvar çalışmaları ile sınırlı kalmaktadırlar. Bununla beraber açık literatürde mevcut bulunan sınırlı parametre ile çalışılmış bina çatı tipi uygulamaları çatı malzemesinin veya geometrisin ısı etkileşimi ile sınırlı kalmış olup bu bağlamda yapılan bu çalışmalar çatı geometrisinin PV panelin elektriksel güç çıktısına olan etkisini incelemek adına literatüre bir katkı sağlayamamaktadır.

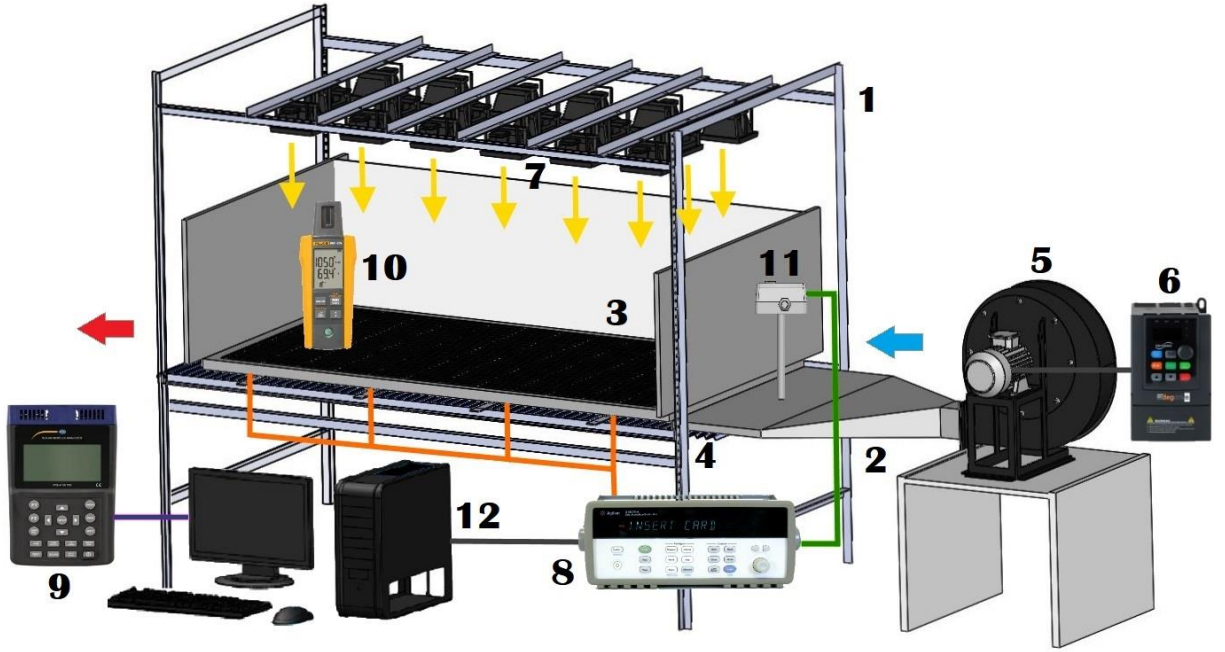
Yukarıda, açık literatürde ulaşılabilen, çeşitli soğutma uygulamaları ile PV panelin elektriksel verimini arttırmayı hedefleyen birtakım çalışmalar özetlenmiştir. Sunulan literatür özetine bakıldığında çatı geometrisinin ve çatı-PV panel arasındaki mesafenin, PV panelin elektriksel verimliliğine olan etkisini inceleyen herhangi bir çalışma bulunamamaktadır. Bu kapsamda çatı geometrisinin ve çatı-PV panel arasındaki mesafenin PV panel verimine olan etkisini incelemek amacıyla bu tez çalışmasında laboratuvar ortamında mono-kristal PV panel kullanılarak bir elektriksel güç çıkışı analiz sistemi kurulmuştur. Bahse konu PV panel, yapılarda yaygın olarak kullanılan oluklu geometriye sahip sandviç çatı üzerine monte edilmiştir. Belirli bir ışınlam değerine maruz bırakılan PV panelin alt yüzeyinde panel-çatı arasındaki boşlukta belirli bir yükseklik değerine sahip bir hava kanalı oluşturulmuştur. Oluşturulan hava kanalından farklı hız değerlerinde hava akışı geçirilerek bu şartlar altında PV panel için elektriksel güç çıkışı, elektriksel verim ve termal verim değerleri hesaplanmıştır. Sonrasında COMSOL Multiphysics CFD analiz programı yardımıyla 2D ve 3D modellemeler yapılarak elde edilen hesaplamalar doğrulanmış ve farklı geometrilerdeki sandviç çatı modellerinde, farklı panel-çatı arası mesafe değerlerinde, farklı ışınlam yoğunluklarında ve farklı hava akış hızlarında parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda PV panelin hangi şartlar altında en düşük yüzey sıcaklığına ulaştığı ve dolayısıyla elektriksel verim anlamında en iyi performansı gösterdiği belirlenmiştir.

MATERYAL VE METOT

Deney Düzeneği

Çatı uygulamalarında PV panel verimine doğrudan etki eden güneş ışı nım şiddeti, çatı-PV panel arası mesafe ve çatı geometrik yapısı gibi farklı tasarım parametrelerinin geniş bir çalışma aralığında ve farklı soğutucu akışkan hızlarında PV panel yüzey sıcaklığına ve dolayısıyla PV panel elektriksel verimliliğine olan etkisini sayısal olarak incelemek için COMSOL Multiphysics ortamında bir simülasyon programı geliştirilmiştir. Bahse konu program ile sayısal çalışmalara başlamadan önce programın kabul edilebilir doğru sonuçlar üretip üretmediğı sorgulanmıştır. Literatürde bu tez çalışmasına konu olan problem ile doğrudan ilişkili rapor edilmiş herhangi bir çalışma olmadığından söz konusu doğrulama işlemi bu tez çalışması kapsamında tasarımı ve üretimi yapılan deney düzeneğinde sınırlı sayıda parametre için gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile neticelendirilmiştir.

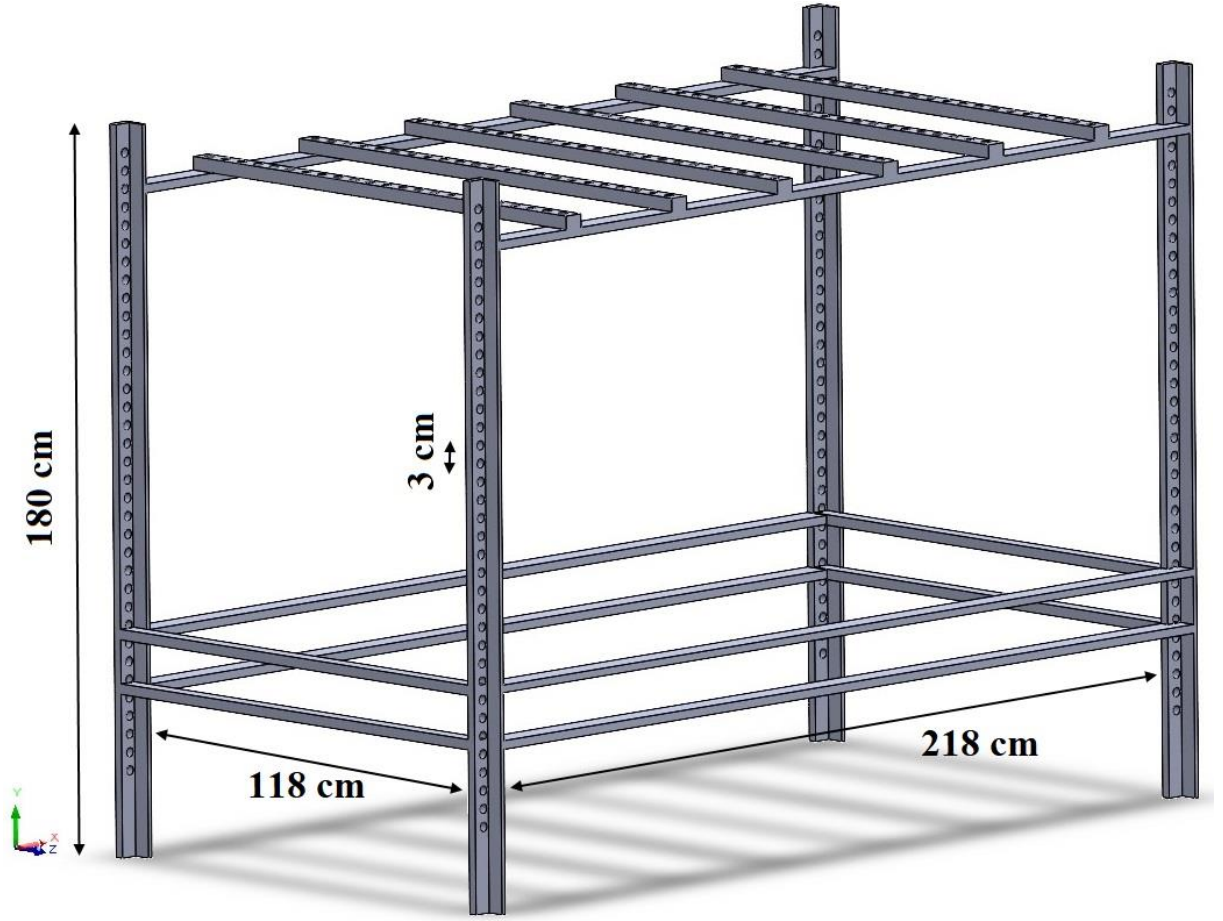
Deneyler, Atatürk Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü tarafından FDK-2022-11165 proje numarasıyla desteklenen “Sandviç çatı panel geometrik özelliklerinin fotovoltai k modül performansı üzerine olan etkilerinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi” isimli proje kapsamında, Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü Enerji laboratuvarı içerisinde kurulan deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 12’de şematik gösterimi verilen deney düzeneğı demir stant, hava giriş kanalı, PV panel, sandviç çatı, fan, invertör halojen projektörler, veri toplama cihazı, güç ölçüm cihazı, güneş ışı nım ölçüm cihazı anemometre ve bilgisayar gibi temel sistem bileşenlerinin ve ölçüm aletlerinin bir araya getirilmesi ile oluşturulmuştur. Düzenek içerisinde her bir bileşenin fonksiyonu, teknik özellikleri, tasarım ve üretim süreci alt başlıklar halinde aşağıda detaylı bir şekilde sunulmuştur.



Şekil 12. Deney düzeneği şematik gösterimi (1. Demir stant, 2. Hava giriş kanalı, 3. PV panel, 4. Sandviç çatı, 5. Fan, 6. İnvertör 7. Halojen projektörler, 8. Veri toplama cihazı, 9. Güç ölçüm cihazı, 10. Güneş ışınım ölçüm cihazı 11. Anemometre, 12. Bilgisayar)

Demir Standın Tasarlanması ve Üretimi

Deney düzeneğinin kurulabilmesi için ilk olarak PV panel, çatı malzemesi ve halojen projektörlerin sabitlendiği demir standın tasarımı ve sonrasında üretimi gerçekleştirilmiştir. Tasarım aşamasında PV panel üzerine gelen ışınım şiddetini dolayısıyla PV panel ile halojen projektörler arasındaki mesafenin istenildiği şekilde değiştirilebileceği bir tasarım, CAD ortamında modellenmiştir. Şekil 13’de görseli verilen tasarım ile projektörleri düşey doğrultuda PV panele yaklaştırmak veya uzaklaştırmak için dikey ayaklara 3 cm aralıklar ile delikler açılmıştır. Bu delikler vasıtasıyla hem belirli bir mesafede çatı malzemesi ile PV panel sabitlenebilmekte hem de PV panel ile projektörler arasındaki mesafe değiştirilebilmektedir.



Şekil 13. Tasarlanan demir standın teknik çizimi

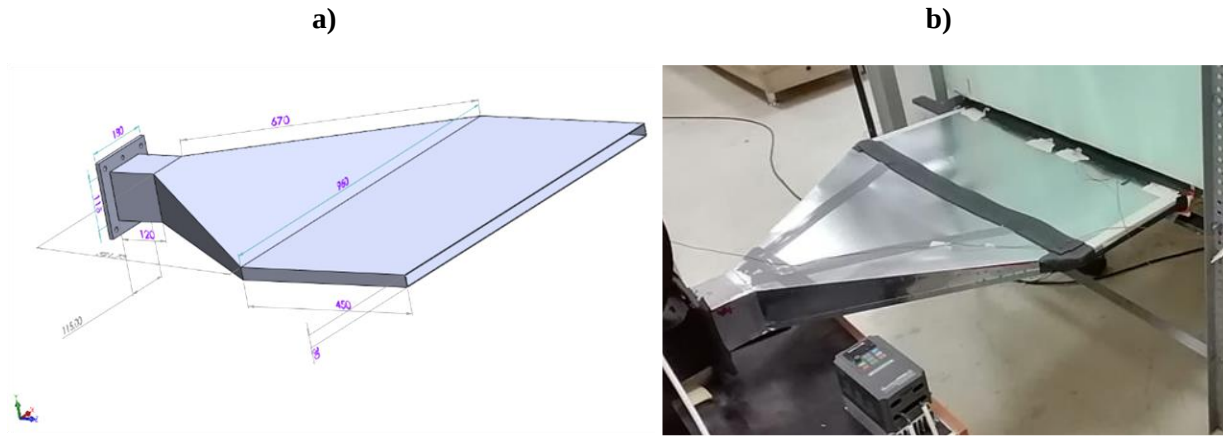
Tasarımı gerçekleştirilen deney standı boyutları 50x50x4 olan L profil demir malzemeden kesilen yatay ve düşey bileşenlerin laboratuvar ortamında cıvata somun bağlantısı ile bir araya getirilmesi neticesinde üretilmiştir. Şekil 14’de son hali gösterilen demir deney standı, paslanmaya karşı astar boya ile boyanmıştır.



Şekil 14. PV panel, çatı malzemesi ve halojen projektörlerin yerleştirileceği demir standın son hali.

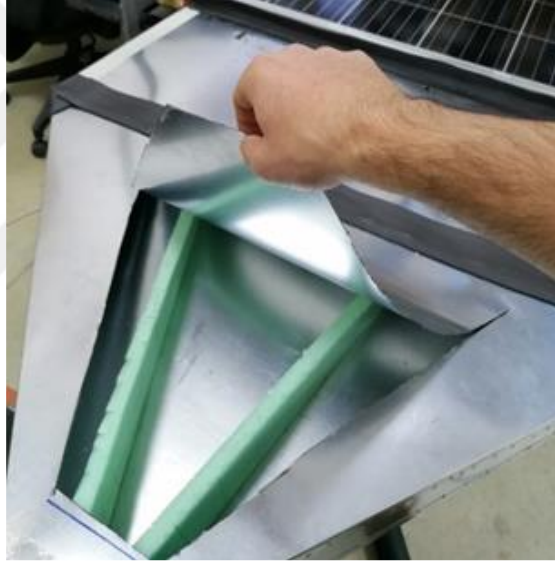
Hava Giriş Kanalı (Redüktör)

Fan ile sonraki bölümlerde detaylı olarak bahsedilecek olan PV panel-sandviç çatı arasındaki kanalın bağlantısını sağlamak için şematik gösterimi Şekil 15.a'da, fotoğrafı ise Şekil 15.b'de verilen kanal redüktörü, SolidWorks CAD programı vasıtasıyla tasarlandıktan sonra galvaniz sacdan punta kaynağı ile üretilmiştir. Punta kaynağının yapıldığı noktalar ile bağlantı yüzeylerinde hava sızdırmazlığını sağlamak için alüminyum folyo ve köpük bant kullanılmıştır.



Şekil 15. a) Kanal redüktörü şematik gösterimi. b) Kanal redüktörü fotoğrafı.

Çatı yüzeyi ile PV panel arasında oluşturulan kanal girişinde üniform bir hız dağılımı elde etmek için redüktör içerisinde Şekil 16’da görseli verilen dağıtıcı köpük levhalar ile kanal girişi öncesinde akış düzeltici bal peteği malzeme kullanılmıştır.



Şekil 16. a) Redüktör içerisine yerleştirilen dağıtıcı köpük levhalar.

Fotovoltaik (PV) Panel

Deneyisel çalışmada, görseli Şekil 17’de, teknik özellikleri ise Tablo 1’de verilen, çatı ve arazi uygulamalarda en çok kullanılan mono-kristal PV panel tercih edilmiştir. Mono-kristal PV panel seçilmesinin nedeni yüksek verimli ve daha uzun ömürlü oluşları, yüksek sıcaklıklarda daha iyi performans göstermeleri ve aynı boyutlardaki poli-kristal PV panellere göre daha yüksek güç çıkışı verebilmelerinden dolayıdır (Bilen vd. (2023)). Bahse konu mono-kristal PV panel 410 W gücünde olup 2000 mm uzunluğunda ve 1000 mm genişliğinde ölçülere sahiptir.



Şekil 17. Deneysel çalışmada kullanılan mono-kristal PV panele ait görsel.

Tablo 1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Mono-Kristal PV Panelin Standart Test Koşullarındaki Teknik Özellikleri.

Modül Türü	Mono-Kristal
Maksimum Güç	410 Wp
Maksimum Yükte Voltaj	41,42 V
Maksimum Yükte Akım	9,90 A
Açık Devre Voltajı	49,70 V
Kısa Devre Akımı	10,44 A
Modül Alanı	2 m ²
Referans Sıcaklık	25 °C
Güç Toleransı	% ±3

Güneş Işınımı Simülatörü

Deneysel çalışmalar, kapalı laboratuvar ortamında gerçekleştirildiği için güneş, görseli Şekil 18’de verilen her biri 500 W gücünde olan 18 adet halojen projektörler kullanılmak suretiyle simüle edilmiştir. Güneşi simüle etmek için kullanılan bu yaklaşım literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır (Kazem vd. (2022), Fayaz vd. (2018), Solanki vd. (2009)).



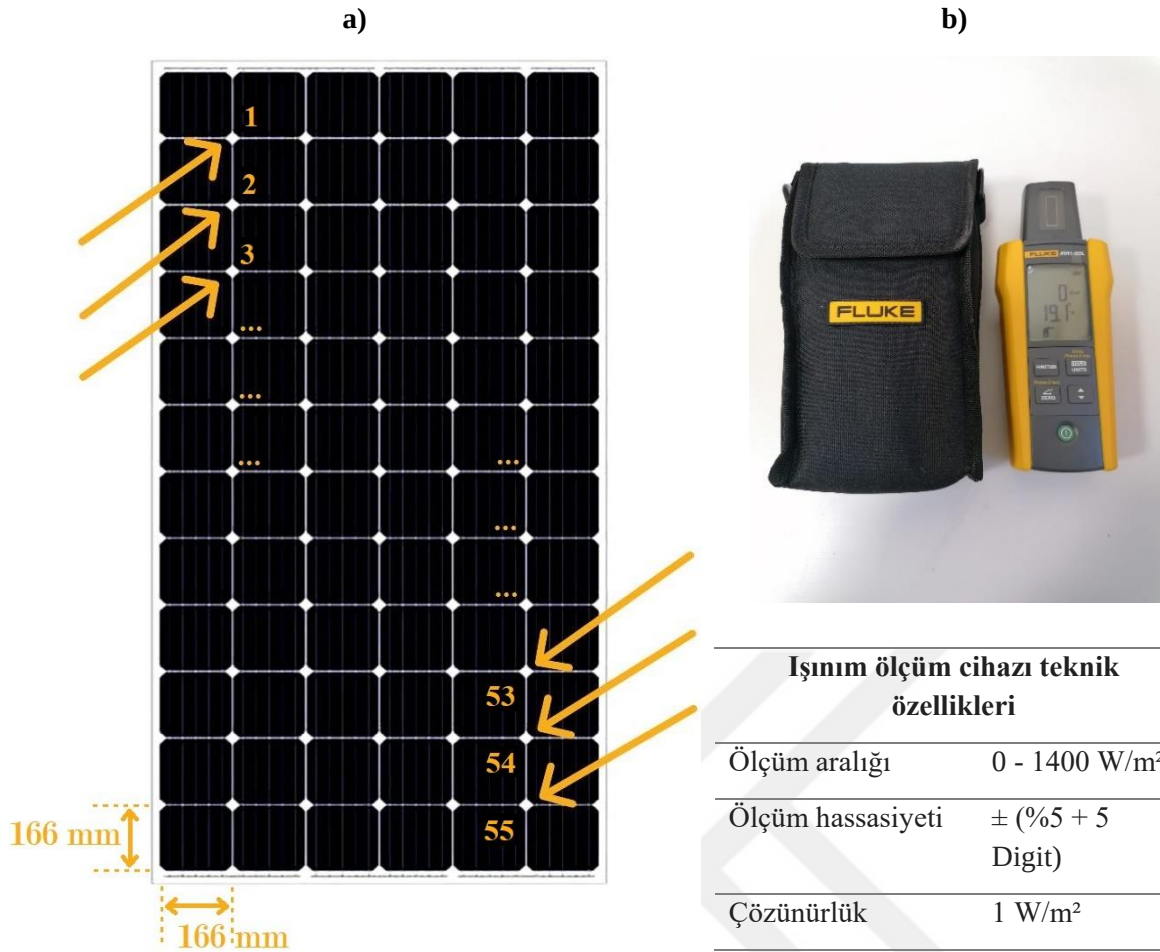
Şekil 18. Laboratuvar ortamında güneşi simüle etmek için kullanılan halojen projektör.

Güneş Işınım Şiddeti Ayarı

Fotovoltaik panel üzerine gelen ve halojen projektörler ile sağlanan ışınımın şiddeti, projektörler ile PV panel arasındaki mesafesinin değiştirilmesiyle ayarlanmıştır. Işınımın ortalama şiddeti ise fotovoltaik panel üzerinde 55 farklı noktada ışınım şiddeti ölçüldükten sonra bu ölçümlerin ortalaması alınarak tayin edilmiştir.

Güneş Işınım Ölçüm Cihazı

PV sistemin performans analizlerini yapabilmek için birim alana düşen ışınımın gücünün bilinmesi gerekmektedir. Bu bağlamda ışınım şiddeti belirlenirken PV panel üzerinde aşağıda Şekil 19.a'da koordinatları verilen 55 farklı noktada, Şekil 19.b'de görseli ve teknik özellikleri verilen ışınım ölçüm cihazı (Fluke FLK-IRR1-SOL solar metre) ile okumalar yapılmış daha sonra yapılan bu okumaların ortalaması alınarak belirli bir panel-projektör arası mesafe için ortalama ışınım şiddeti tayin edilmiştir. Ayrıca, deneylere başlanılmadan önce söz konusu cihazın doğru ölçüm yapıp yapmadığı güneş ışığı altında harici bir piranometre ile test edilmiştir.



Şekil 19. a) PV panel üzerinde ışıınım ölçümü yapılan noktalar b) Işıının şiddetini ölçmek için kullanılan güneş ışıınım ölçüm cihazının görseli ve teknik özellikleri.

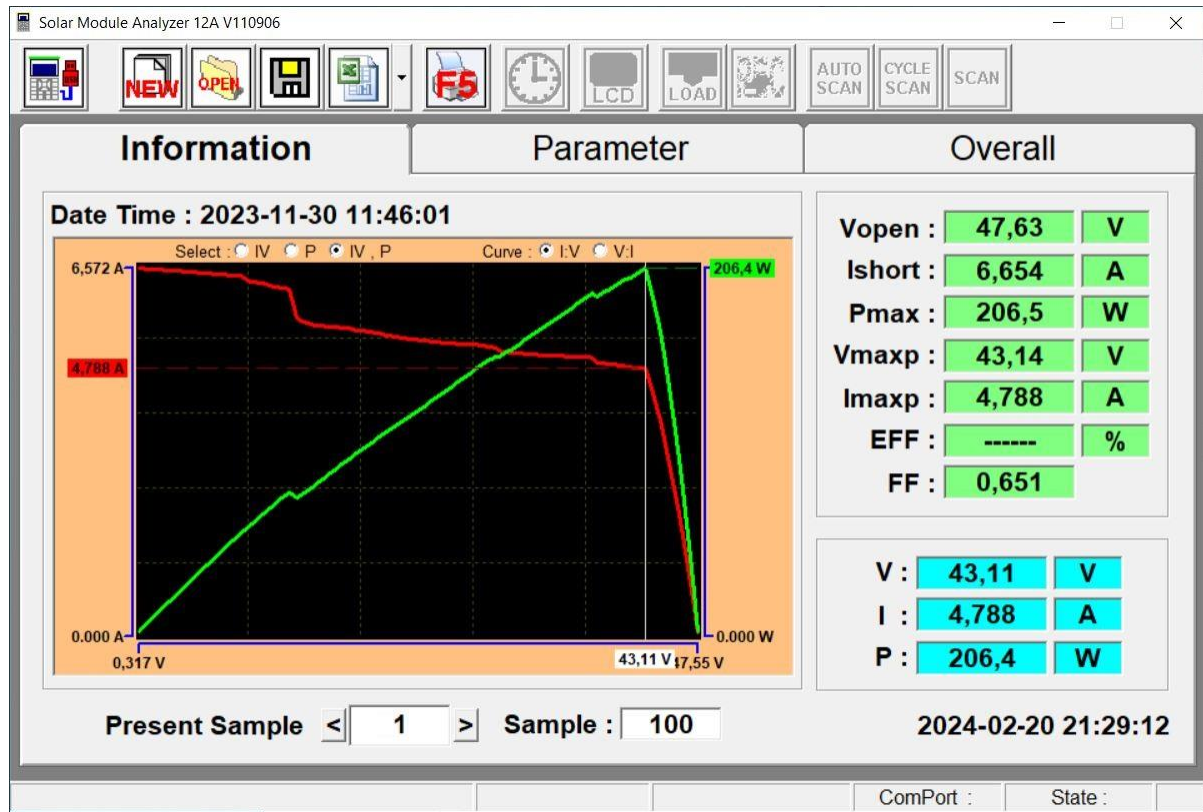
Güneş Modülü Güç Ölçüm Cihazı (MPPT)

Işıınımına maruz bırakılan PV panellerdeki elektron hareketi sonucu oluşan gerilim (V), akım (I) ve dolum faktörü (FF) değerlerini ve ayrıca panellerden elde edilen maksimum elektriksel güç çıktısını (P_{maks}) ölçmek için maksimum güç noktası izleme tekniğini (MPPT: Maximum Power Point Tracking) kullanarak ölçüm yapan görseli Şekil 20’de sunulan güneş modülü güç ölçüm cihazı (PCE-PVA 100 panel test cihazı) kullanılmıştır (Raina et al., 2022; Rawat et al., 2014) .



Şekil 20. Güneş modülü güç ölçüm cihazı.

Bir fotovoltaik hücre geniş bir gerilim ve akım değeri aralığında çalışabilmektedir. Bununla beraber çıkış gücü, hem kısa devre akımı (I_{sc}) hem de açık devre gerilimi (V_{oc}) sınır değerlerinin her ikisinde de sıfırdır. Maksimum güç noktasında gerilim ve akım, açık devre gerilimi ve kısa devre akımı dışındaki en yüksek değerine ulaşır. Bu değerler sırasıyla Şekil 21’de V_{maxp} ve I_{maxp} ile gösterilmektedir. Bu noktada, PV hücreler maruz bırakıldıkları ışınım şiddeti altında en yüksek elektriksel güç değerini üretir. PV hücrenin üretebileceği en yüksek çıkış gücü Şekil 21’de görüldüğü gibi, hücrenin I-V eğrisi (kırmızı) altında kalan maksimum dikdörtgen alana diğer bir deyişle oluşturan bu eğrinin uç noktasındaki akım ve gerilim değerlerinin çarpımına ($P_{maks} = V_{maxp} * I_{maxp}$) eşittir.



Şekil 21. Güneş modülü güç ölçüm cihazı ile elde edilen akım-gerilim (kırmızı) ve güç çıktısı (yeşil) eğrisi (güç ölçüm cihaz yazılımı ara yüzü).

Fan ve İnvertör

Deneylerde PV panel alt yüzeyi ile panelin monte edildiği çatı profili arasında kalan boşluktaki hava akışı 0,094 kg/s kütleli dehide hava temin edebilen bir fan (BVN ORB 5) vasıtasıyla sağlanmıştır. Fan ayakları ile ayakların monte edildiği zemin arasına 5 mm kalınlığında kauçuk levhalar yerleştirilerek titreşimler minimize edilmiştir. Deneylerde fanın devir sayısını ve dolayısıyla kanal girişindeki akışkan hızını değiştirebilmek amacıyla bir frekans invertörü (Degdrive-DGI300) kullanılmıştır. Şekil 22.a'da, kullanılan fan ve invertör, Şekil 22.b'de ise fanın teknik özellikleri sunulmuştur.



a)



b)

Şekil 22. a) Deneylerde kullanılan fan ve invertör, b) Fanın teknik özellikleri

Hız Ölçer

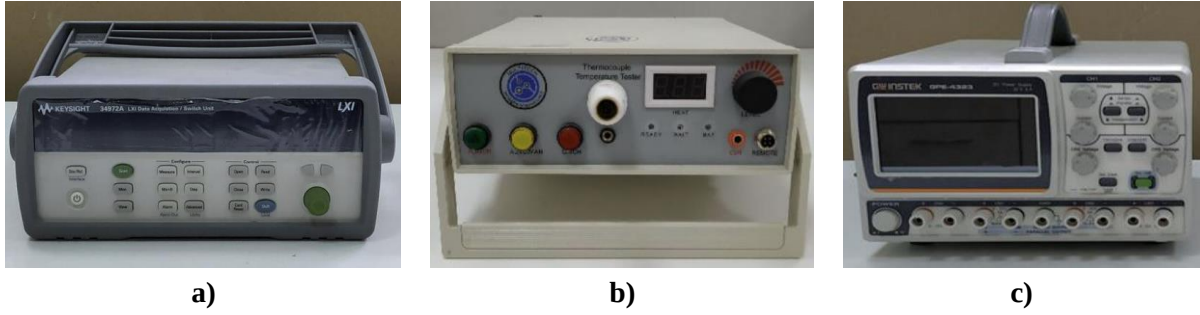
Kanal girişinde ve çıkışındaki havanın hızını ve dolayısıyla kütleli debisini belirleyebilmek adına Kimo CTV 110 marka anemometre kullanılmıştır. Anemometrenin probu kanal girişinden ve çıkışından 1 cm uzaklığa ve akışa dik yönde yerleştirilerek kanal genişliğince yaklaşık 20 cm aralıklarla 4 noktadan ölçümler alınmıştır. Bu noktalarda okunan hava hızının ortalaması alınarak kütleli debi hesaplanmıştır. Deneyler boyunca belli aralıklarla manuel olarak okunan hız değerleri de ayrıca kayıt altına alınmıştır. Deneye başlamadan önce anemometreden okunan hız değeri kontrol edilerek frekans invertörü ile kanaldaki akışkan hızı istenilen değere ayarlanmıştır.



Şekil 23. Deneylerde kullanılan Anemometre (Hız ölçüm cihazı).

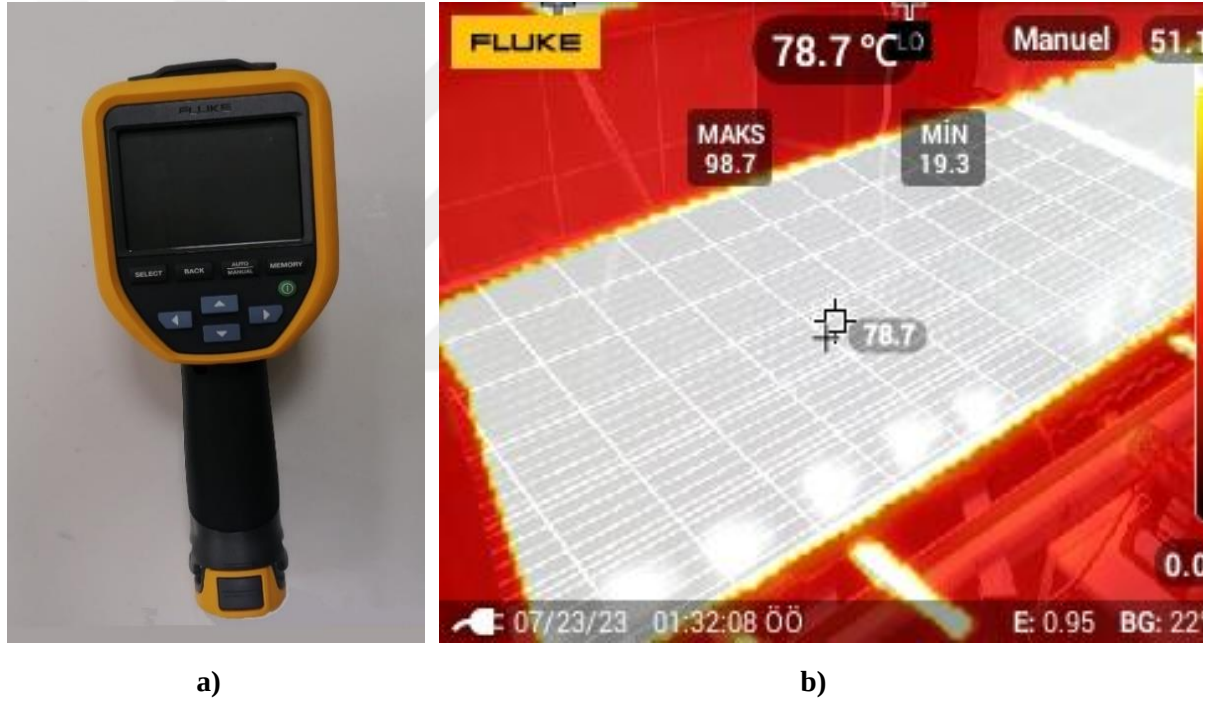
Veri Toplama ve Kayıt Sistemi

Deneysel ölçümlerin (sıcaklık ve hız) kayıt altına alınması amacıyla Şekil 24.a'da görseli sunulan bir veri toplama cihazı (Keysight 34972A Datalogger) kullanılmıştır. Deneyler sırasında veri toplama cihazı ile sıcaklık ve hız olmak üzere iki tip ölçüm kayıt altına alınmıştır. Sıcaklık ölçümleri için 30 gauge (0,25 mm) T tipi ısıl çiftler kullanılmıştır. Isıl çiftlerin bir ucu Şekil 24.b'de verilen ısıl çift kaynak makinesi ile kaynaklanarak birleştirilmiş ve ölçüm yapılmak istenen noktaya yerleştirilmiştir. Isıl çiftlerin diğer ucu ise + /- konumlu olarak veri toplama cihazının çoklayıcı ünitesine vidalanarak bağlanmıştır. Deneylerde hava hızını ölçmek için kullanılan Kimo CTV 110 marka anemometre ise üzerine çarpan hava akımını 4-20 mA aralığında elektrik sinyaline dönüştüren bir sensöre sahiptir. Anemometre, elde edilen akım sinyalini kullanarak hava hızını 0-30 m/s aralığında ölçebilmektedir. Cihazın çalışma prensibi, ölçülen akım değerinin hava hızına doğrusal olarak oranlanması esasına dayanmaktadır. Örneğin 4 mA değeri 0 m/s'lik bir hava hızına karşılık gelirken, 20 mA değeri ise 30 m/s'lik maksimum hava hızını temsil etmektedir. Bu tür anemometreler, geniş ölçüm aralığı ve hassasiyetleri nedeniyle endüstriyel uygulamalarda ve laboratuvar ortamlarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bahse konu anemometre, probuna çarpan havanın oluşturduğu akımı mili amper cinsinden okuyabilmesi adına ısıl çiftlerin bağlandığı aynı veri toplama cihazının çoklayıcı ünitesine vidalanarak bağlanmıştır. Sıcaklık ve hız değerleri istenilen zaman aralıkları ile bilgisayara kurulan bir yazılım sayesinde anlık kayıt altına alınabilmektedir. Ayrıca anemometrenin çalışabilmesi için gerekli gerilim değerlerini sağlamak amacıyla da Şekil 24.c'de gösterilen güç kaynağı (GW Instek GPE 4323) kullanılmıştır.



Şekil 24. a) Veri toplama cihazı. b) Isıl çift kaynak cihazı. c) Güç kaynağı.

Bununla beraber PV panelin alt yüzeyinden ısıal çiftlerle sıcaklık değeri okunmasının yanı sıra panel üst yüzeyinde doğrulama amacıyla bir termal kamera (Fluke TiS20+) ile sıcaklık okuması yapılmıştır. Bu amaç doğrultusunda kullanılan termal kamera ve yapılan termal görüntüleme örneği Şekil 25’de gösterilmektedir.



Şekil 25. a) Termal kamera ve b) termal görüntü.

Deney Düzenekinin Kurulumu ve Montaj Aşaması

Deney düzeneğinin birçok elemanını üzerinde bulunduran demir stant üretilip kurulumu yapıldıktan sonra, PV panel ölçülerinde temin edilen PVC (polivinil klorür) malzemeden üretilmiş oluklu panel çatı malzemesi yerden yaklaşık 70 cm yükseklikte, demir standı yerleştirilmiştir. Çatı malzemesi üzerine ise belirli bir mesafede 2 metre uzunluğunda ve 1 metre genişliğindeki mono-kristal PV panelin montajı yapılmıştır. Halojen projektörler belirli bir mesafede PV panel üzerine konumlandırılmıştır. Üretimi gerçekleştirilen deney standı aşağıdan yukarıya doğru çatı, PV panel ve halojen lambalar olmak üzere üç farklı yapıya ev sahipliği

yapmakta olup isteğe bağılı olarak her bir yapı arasındaki mesafe dikey ayaklar üzerinde bulunan delikler vasıtasıyla değiştirilebilmektedir. Dolayısıyla deneysel süreçte PV panel ve çatı arası mesafe ile halojen lambaların PV panel yüzeyine uzaklığı bu delikler vasıtasıyla istenilen değere ayarlanabilmektedir.



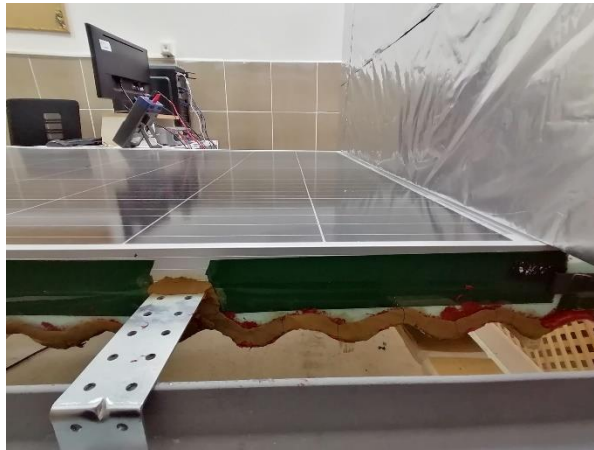
Şekil 26. Demir standın üzerine PV panel, çatı malzemesi ve projektörlerin yerleştirilmesi.

PV panelin alt yüzey sıcaklığını ölçmek için sırasıyla uzun ve kısa kenar boyunca aralarındaki mesafe 40 cm ve 25 cm olan uzun kenarda 4 sıra, kısa kenarda 3 sıra olmak üzere toplam 12 adet T tipi ısı çifti, panel yüzeyine sabitlenmiştir. Isıl çiftlerin panel arka yüzeyindeki konumlarını gösteren fotoğraf ve şematik gösterim sırasıyla Şekil 27.a ve Şekil 27.c’de sunulmuştur. Isıl çiftler, uç kısımlarına 8 W/mK ısıl iletkenlik değerini sahip termal macun sürüldükten sonra yüzeye yapışkan macun ve alüminyum bant ile tutturulmuşlardır. Çatı

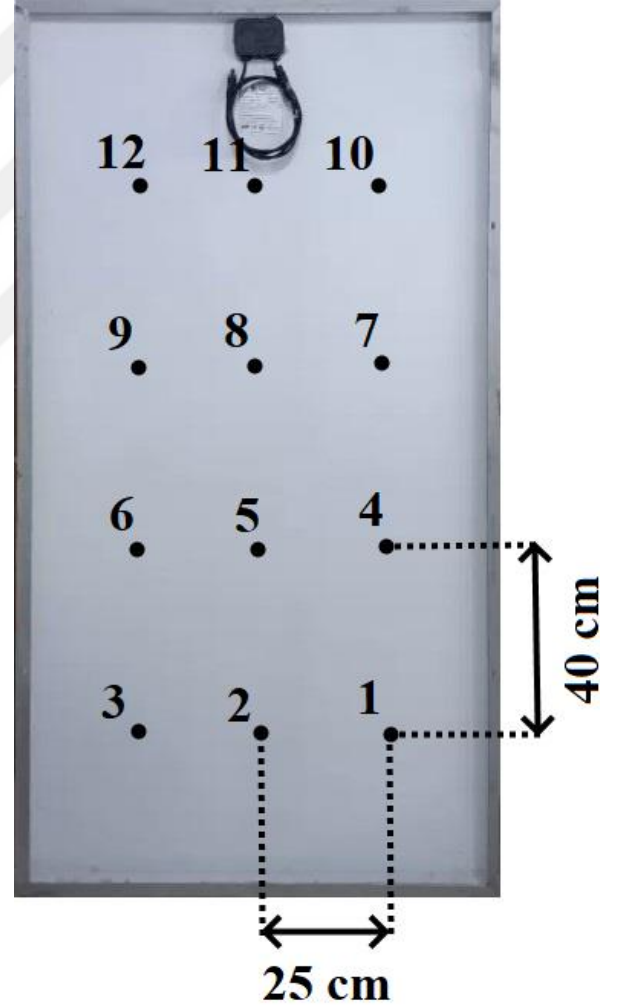
malzemesi deney standına yerden yaklaşık 70 cm yükseklikte yerleştirildikten sonra deney standının dikey ayakları üzerinde bulunan delikler yardımıyla PV panel, oluklu çatı malzemesinin üst noktası ile aralarındaki mesafe 65 mm olacak şekilde standa monte edilmiştir. Uzun kenar boyunca PV panel ile çatı malzemesi arasındaki boşluk strafor malzeme ile kapatılarak bir akış kanalı formu oluşturulmuştur. Strafor malzeme ile PV panel ve çatı malzemesi arasında meydana gelen boşluklar tam bir sızdırmazlık sağlamak adına önce ısıya dayanıklı kırmızı silikon malzeme ile sonra da cam macunu ile doldurulmak suretiyle kapatılmıştır. Sonuç olarak Şekil 27.b’de gösterilen bir kanal formu elde edilmiştir. Diğer taraftan kanal giriş ve çıkışında ortalama akışkan sıcaklığını okumak için akışa dik yönde kanal giriş ve çıkışında üçer adet ısıl çift kullanılmıştır. Ayrıca, deneylerin yapıldığı ortamın sıcaklığı da iki adet ısıl çift vasıtasıyla ölçülmüştür.



a)



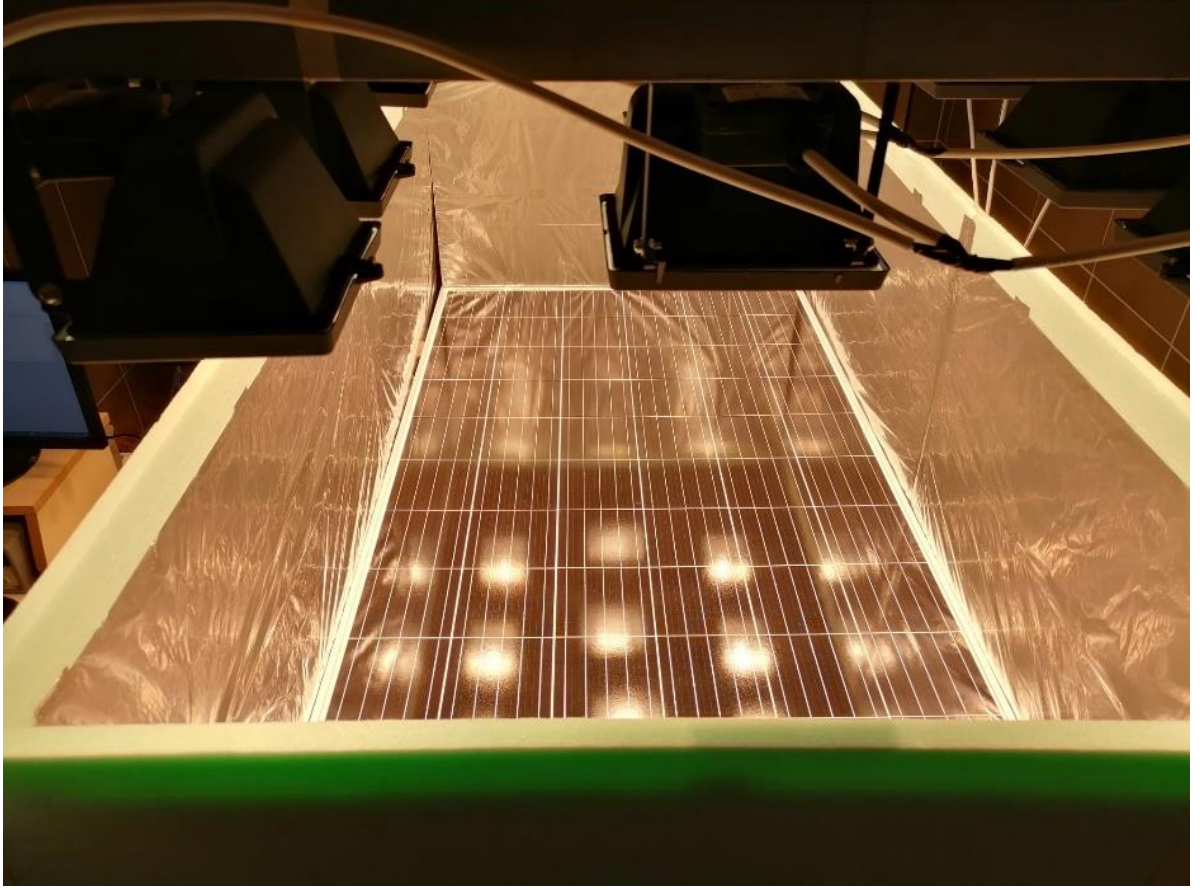
b)



c)

Şekil 27. a) PV panel alt yüzeyine yerleştirilen ısıl çiftler b) akış doğrultusunda PV panel ve çatı malzemesi arasındaki boşluğun kapatılarak kanal formu oluşturulması c) alt yüzeye yerleştirilen ısıl çiftlerin konumlarının şematik gösterimi.

birbirine paralel olarak bağlanmış ve panelin üzerine 3*6 diziliminde aralarındaki mesafe eşit olacak şekilde yerleştirilmişlerdir. Ayrıca ışıınım yolu ile çevreye olan ısı kaybını en aza indirebilmek adına PV panel ile projektörler arasındaki dikey mesafe, Şekil 29'dan da görülebileceği üzere alüminyum kaplı plakalar ile izole edilmiştir.



Şekil 29. Projektörler ile PV panel arasındaki dikey mesafenin izole edildiği ortama ait görüntü.

Işınımına maruz bırakılan PV panelden elde edilecek elektriksel güç çıktısını Watt cinsinden ölçecek olan güneş modülü güç ölçüm cihazının, PV panel ve bilgisayar ile bağlantısı kurulmuştur. Sonrasında ise anemometre ve ısı çiftleri ile bağlantısı yapılan veri toplama cihazının bilgisayar ile bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlerden sonra Şekil 30'da görseli verilen deney düzeneğinin son hali elde edilmiştir.



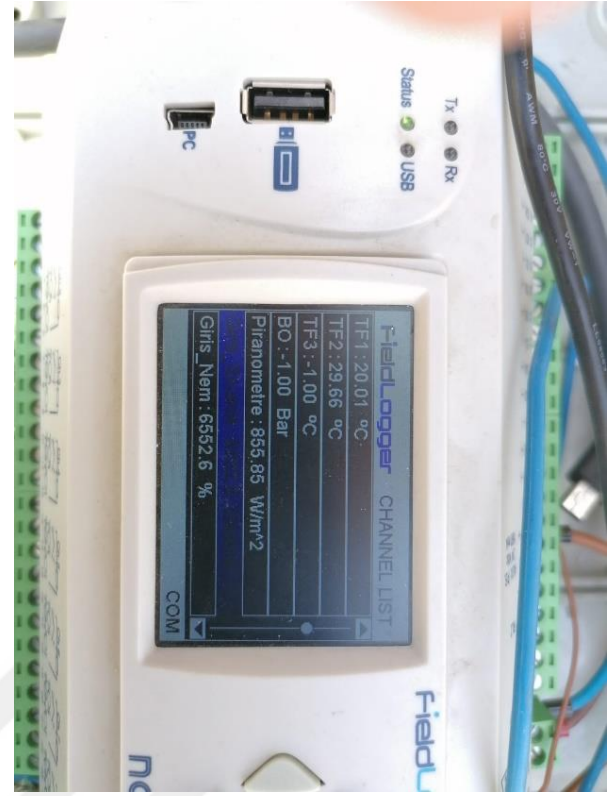
Şekil 30. Deney düzeneğinin son haline ait görsel.

Deney Prosedürü

Deneyisel veri almaya başlamadan önce kanalda hava akışı var iken kanalın birleşim noktalarına su oranı düşük (yoğun) bir köpük uygulanarak bu noktalarda herhangi bir hava sızıntısının olup olmadığı kontrol edilmiştir. Uygulanan köpük temizlendikten sonra tüm birleşim yüzeylerine ek önlem amacıyla soğuk silikon uygulanmıştır. Ayrıca halojen lambalar ile sağlanan ısıtım değerinin ölçülmesinde kullanılan elektronik ısıtım ölçüm cihazının doğru ölçüm yapıp yapmadığı, Temmuz ayında dış ortamda anlık ısıtım şiddetinin hem elektronik ısıtım ölçüm cihazı hem de kalibre piranometre ile ölçülerek karşılaştırılması ile test edilmiştir (Şekil 31). Yapılan bu teste ilişkin elde edilen sonuçlar ışığında söz konusu cihazın kalibre piranometreden maksimum %1,76 sapma gösterdiği bu oranın ise kabul edilebilir olduğu değerlendirilmiştir.



a)



b)

Şekil 31. Işınım şiddetinin iki farklı cihazla ölçümüne yönelik yapılan test a) Fluke FLK-IRR1-SOL elektronik ışıınım ölçüm cihazı ile okunan değer b) Hukseflux SR05-A1 Piranometre ile okunan değer.

Deney sistemi kurulduktan sonra ilk olarak PV panelin sıcaklığa bağlı elektriksel güç üretim testleri zamana bağlı koşullarda gerçekleştirilmiştir. PV panelin ürettiği elektriksel güç değeri deney boyunca anlık olarak ölçülerek zamana bağlı sıcaklık değişimi ve panel sıcaklığının sürekli hale gelmesi için gerekli süre tespit edilmiştir. Bu deneyler 855 W/m^2 ışıınım değerinde ve fan ile sağlanan $1,24 \text{ m/s}$ hava hızı, $0,094 \text{ kg/s}$ hava kütleli debisinde gerçekleştirilmiştir. Bu ısı akısını elde etmek için PV panel ve projektörler arasındaki mesafe 65 cm olarak belirlenmiştir.

Sonrasında yapılan deneyler ise farklı akışkan hızı ve dolayısıyla farklı kütleli debi değerlerinde gerçekleştirilmiş ve veriler sürekli rejim koşullarında alınmıştır. Bu deneyler 750 W/m^2 ışıınım değerinde gerçekleştirilmiştir. Bu ısı akısını elde etmek için PV panel ve projektörler arasındaki mesafe 85 cm olarak belirlenmiştir. Ayrıca, frekans invertörü kullanılarak farklı akışkan hızlarına karşılık gelen $0,031\text{-}0,094 \text{ kg/s}$ kütleli debi aralığında 65 mm sabit kanal yüksekliğinde deneyler yürütülmüştür. Deneylerde sabit kanal yüksekliği ve ışıınım şiddeti ile belirli bir çatı profili için PV panel sıcaklığının hava akış hızı, dolayısıyla debi ile nasıl değiştiği incelenmiştir. Deney matrisi Tablo 2’de sunulmuştur. Deneyler sırasında sıcaklık ölçümü yapılan noktalardaki ısı çift verileri 30 saniyelik aralıklarla veri kayıt cihazının

yazılımı ile kayıt altına alınmıştır. PV panel alt yüzeyinden her 15 dakikada okunan ardışık sıcaklık değerleri arasındaki değişim $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den daha az gerçekleşmeye başladığı zaman sürekli rejim koşuluna ulaşıldığı kabul edilmiştir (Tzeng & Jeng, 2006). Ayrıca, her bir deneysel çalışma öncesinde PV panel üst yüzeyi hassas bir şekilde temizlenerek toz ve kir etkisinden doğacak performans kayıpları bertaraf edilmeye çalışılmıştır.

PV panel, sandviç çatı ve gerekli ölçüm cihazlarından oluşan deney sistemi kurulduktan sonra yapılan her bir deney için izlenen prosedür sırasıyla aşağıda maddeler halinde sunulmuştur. Bunlar; 1. PV Panel Sıcaklığına Göre Elektriksel Güç Üretiminin İncelenmesi ve 2. Hava Akış Hızına Göre PV Panel Sıcaklığının İncelenmesi olarak isimlendirilmiştir.

PV panel sıcaklığına göre elektriksel güç üretiminin incelenmesi

Yapılan deneyler boyunca ilk aşama olarak sabit ışıınım şiddeti altında PV panelin sıcaklık değişimine bağlı ürettiği elektriksel güç, zamana bağlı olarak test edilmiştir. Bu kapsamda;

- Yapılan deneyler 855 W/m^2 ışıınım şiddeti altında gerçekleştirilmiştir. Bu ışıınım şiddetini sağlamak amacıyla PV panel ile projektörler arasındaki mesafe 65 cm olarak ayarlanmıştır. Sonrasında PV panel üzerindeki 55 farklı noktada ışıınım şiddeti ölçülerek bu ölçümlerin ortalaması alınmıştır.
- Daha sonra fan çalıştırılmış ve kanal içindeki akış hızı anemometre ile ölçülerek invertör yardımıyla $1,24\text{ m/s}$ ($0,094\text{ kg/s}$ kütleli debi) koşullarına ayarlanmıştır.
- PV panelin ürettiği anlık elektriksel güç çıktısı deney süresince kesintisiz olarak MPPT cihazı ile ölçülmüş ve kayıt altına alınmıştır.
- Isıl çiftler ile ölçülerek veri toplama cihazı ile bilgisayara aktarılan PV panel sıcaklığının kararlı bir hale gelmesi için gerekli süre tespit edilmiş ve zamana bağlı sıcaklık değişiminin etkileri analiz edilmiştir.
- Bu süre boyunca PV panelin sıcaklık dağılımı ve elektriksel performansı incelenmiştir.

Hava akış hızına göre PV panel sıcaklığının incelenmesi

Sonraki aşamada sabit kanal yüksekliği ve ışıınım şiddeti koşullarında, belirli bir çatı profili altında, PV panel sıcaklığının hava akış hızı ve buna bağlı olarak akış debisi ile nasıl değiştiği incelenmiştir. Bu kapsamda;

- Yapılan deneyler 750 W/m^2 ışıınım şiddeti altında gerçekleştirilmiştir. Bu ışıınım şiddetini sağlamak amacıyla PV panel ile projektörler arasındaki mesafe 85 cm

olarak ayarlanmıştır. Sonrasında PV panel üzerindeki 55 farklı noktada ışıınım şiddeti ölçülerek bu ölçümlerin ortalaması alınmıştır.

- Hava akış hızını kontrol etmek ve farklı kütleli debi değerlerine ulaşmak için frekans invertörü kullanılmıştır. Akışkan hızı, 0,031 kg/s ile 0,094 kg/s aralığındaki kütleli debi değerlerine karşılık gelecek şekilde ayarlanmıştır.
- PV panelin alt yüzeyindeki ısı çiftleri ile her 30 saniyede bir sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Her 15 dakikalık ardışık sıcaklık değerleri arasındaki farkın 0,2 °C'den az olması durumunda sürekli rejim koşullarına ulaşıldığı kabul edilmiştir (Tzeng & Jeng, 2006).
- Farklı hava akış debisi değerlerinde PV panelin sıcaklık dağılımı ve elektriksel performansı analiz edilmiştir.

Ayrıca;

- Yapılan tüm deneyler oluklu sandviç çatı geometrisi ve sabit bir kanal yüksekliği (85 mm) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.
- Her bir deneyden önce PV panelin üst yüzeyi, toz ve kirin panel performansı üzerindeki olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak ve ölçümlerin doğruluğunu artırmak amacıyla hassas bir şekilde temizlenmiştir.
- Bu süreçte kullanılan deney matrisi Tablo 2 de sunulmuştur.

Tablo 2. Deney Matrisi.

Deney No	İşınım şiddeti (W/m ²)	PV panel ile projektörler arasındaki mesafe (cm)	Hava giriş hızı (m/s)	Akışkan kütleli debisi (kg/s)
1	855	65	1,24	0,094
2	750	85	0,41-0,61-0,82-1,02-1,24	0,031-0,047-0,062-0,078-0,094

Deneyisel Hata Analizi

Deneyisel çalışmada ölçümü yapılan büyüklüklerin sahip olduğu belirsizlik değerlerine bağlı olarak ortaya çıkan hatalar Eşitlik (15)'te verilen Gauss hata yayılım yasası kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} W_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} W_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} W_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

Bu eşitlikte R , ölçülen $x_1, x_2 \dots x_n$ 'in fonksiyonu olan bir değerdir. Diğer bir ifade ile $R=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ şeklinde yazılabilir. Burada W_n n'inci ölçülen büyüklüğe ait belirsizlik değerini ifade ederken W_R , R 'nin tahmin edilen belirsizlik değeridir.

Doğrudan ölçülen sıcaklık, hız, ışınlam ve elektriksel güç gibi değerler için hesaplanan deneysel belirsizlikler, söz konusu büyüklükleri ölçmek amacıyla kullanılan cihazların üreticileri tarafından sağlanan katalog değerlerine dayanarak hesaplanmıştır. Bu yöntem kullanılarak hesaplanan elektriksel verim ve ısı verim sonuçlarına ait belirsizlikler; elektriksel verim değeri için %0,23, ısı verim değeri için ise %1,63 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan parametrelerin belirsizliklerine etki eden alt parametrelerin hassasiyet oranları Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Ölçülen Parametrelere Ait Hata Analizinde Kullanılan Hassasiyet Değerleri.

Değişken	Birim	Ölçüm aralığı	Hassasiyet
Akım	V	0...60	$\pm 0,1$
Voltaj	A	0...12	$\pm 0,09$
İşınım şiddeti	W/m ²	0...1400	± 1
Akış hızı	m/s	0...30	$\pm 0,05$
Sıcaklık	°C	-200...+350	$\pm 0,5$

Termodinamik Analiz

Kontrol Hacminde Kütlenin Korunumu (Süreklilik)

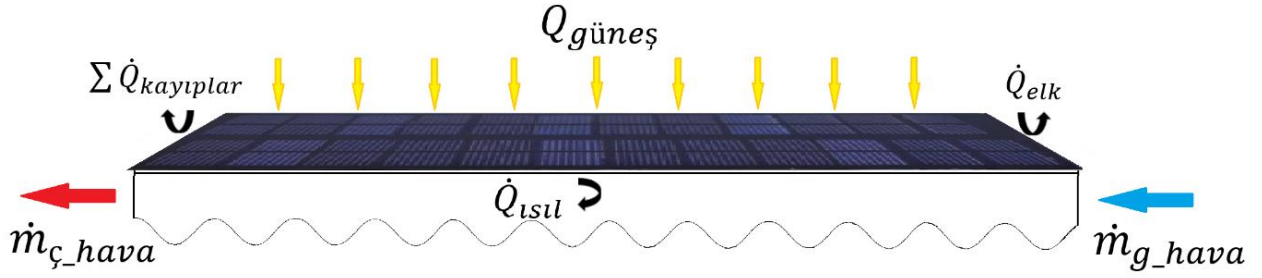
Kontrol hacmi içerisinde sürekli şartlar altında hacim sınırları içerisinde toplam kütle zamanla değişmemektedir ($\dot{m}_{KH} = \text{sabit}$). Bu sebepten dolayı belirli bir zaman aralığında kontrol hacmine giren kütle, aynı zaman aralığında kontrol hacminden çıkan kütleye eşit olacaktır. Bu ifade matematiksel olarak;

$$\sum_g \dot{m} = \sum_{\varphi} \dot{m} \quad (2)$$

Şeklinde ifade edilmektedir. Burada kontrol hacmine giren ve çıkan akışkanın kütleli debisi Eş. (3) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\dot{m} = \rho_f A_f u_f \quad (3)$$

Şekil 32'de PV panel-çatı sistemine ait kontrol hacmi şematik olarak gösterilmektedir. Burada giriş (g) ve çıkış (ç) harfleri ile ifade edilmiştir.



Şekil 32. Deneysel çalışmaya konu PV panel-çatı sistemine ait şematik gösterimi.

Kontrol hacmi için enerjinin korunumu

Kontrol hacmi içerisinde sürekli şartlar altında hacim sınırları içerisinde sistemin toplam enerjisi zamanla değişmez ($\Delta E_{KH} = 0$). Bu sebepten dolayı belirli bir zaman aralığında kontrol hacmine ısı, kütle ve iş şeklinde giren enerjinin kontrol hacminden çıkan enerjiye eşit olması gerekmektedir.

$$\left[\text{Belirli zaman aralığında sınırlardan} \right] = \left[\text{Aynı zaman aralığında sınırlardan} \right]$$

$$\left[\text{ısı, iş ve kütle ile giren toplam enerji} \right] = \left[\text{ısı, iş ve kütle ile çıkan toplam enerji} \right]$$

Bu ifade matematiksel olarak;

$$\dot{Q}_{ısıl} = \dot{m}(h_{\dot{c}} - h_g) \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{ısıl} = \dot{m}c_p(T_{\dot{c}} - T_g) \quad (5)$$

Eşitlikleri kullanılarak yazılabilir. Eş. (4) ile ifade edilen $\dot{Q}_{ısıl}$, kanal içerisinde akmakta olan havaya kontrol hacmi sınırlarından ısı transferi ile birim zamanda gerçekleşen enerji geçişini ifade etmektedir.

Burada h_g ve $h_{\dot{c}}$ havanın kanal girişindeki ve çıkışındaki entalpisini, T_g ve $T_{\dot{c}}$ de sırasıyla havanın kanal girişindeki ve çıkışındaki sıcaklığını göstermektedir. Sonuç olarak Şekil 32’de şematik gösterimi verilen kontrol hacmi için enerji dengesi genel olarak şu şekilde yazılabilir (Rahman et.al 2015, Mamun et.al.,2022);

$$\dot{Q}_{güneş} = \dot{m}(h_{\dot{c}} - h_g) + I.V + \Sigma \dot{Q}_{kayıplar} \quad (6)$$

$$\dot{Q}_{güneş} = \dot{m}c_p(T_{\dot{c}} - T_g) + \dot{Q}_{elk} + \Sigma \dot{Q}_{kayıplar} \quad (7)$$

Burada $\dot{Q}_{güneş}$ [W] güneşten gelen toplam ışınlam şiddeti ($\dot{Q}_{güneş} = A * G$), $\dot{Q}_{elk}$ ise PV panel tarafından elektriğe dönüştürülen enerji miktarıdır. Panel ile ortam arasında meydana gelen sıcaklık farkı ortaya bir termal iş çıkarmaktadır. Deney sisteminde ortaya çıkan bu termal

işin termodinamiğin birinci yasasıyla ifade edilen ısı verimi ise Eş. (8) vasıtasıyla hesaplanmıştır;

$$\eta_{ısı} = \frac{\dot{Q}_{ısı}}{\dot{Q}_{güneş}} \quad (8)$$

Elektriksel Analiz

PV panel üzerine düşen güneş enerjisinin tamamı PV hücreler tarafından elektriksel enerjiye dönüştürülemez. Güneşten gelen enerjinin elektriğe dönüşmeyen kısmı, enerji dengesinden yola çıkarak matematiksel olarak;

$$\dot{Q}_{kayıplar} = \dot{Q}_{güneş} - \dot{Q}_{ısı} - \dot{Q}_{elk} \quad (9)$$

Eşitliği kullanılarak hesaplanabilir. PV panelin anlık elektriksel verimi (etkinliği) Eş. (10) ile hesaplanmıştır (Jamil et al.2021, Das et al. 2021).

$$\eta_{elk} = \frac{\dot{Q}_{elk}}{\dot{Q}_{güneş}} \quad (10)$$

Burada $\dot{Q}_{elk}$, güneş modülü güç ölçüm cihazı ile deneyler boyunca bir dakikalık aralıklarla ölçülmektedir.

$$\eta_{elk} = \eta_{sc}[1 - \mu_{sc}(T_{sc} - T_{ref})] \quad (11)$$

Diğer taraftan PV panelin anlık elektriksel etkinliğini PV panel hücre sıcaklığının bir fonksiyonu olarak veren ifade ise Eş. (11) (Sultan et al. 2020, Mamun et al., 2022; Zhang et al., 2022, Li et al., 2024) ile gösterilmiştir. Sayısal çalışma boyunca anlık elektriksel etkinlik değeri hesaplanırken bu eşitlikten yararlanılmıştır. Burada T_{sc} , anlık PV hücre sıcaklığını ifade etmektedir. Diğer parametrik değerler ise Tablo 4’de sunulmuştur.

Tablo 4. PV Panel Isı Transferi Parametreleri.

Parametreler	Değerler
PV panel referans test verimi, (η_{sc})	0,12 (Mamun et al., 2022)
PV panel sıcaklık katsayısı, (μ_{sc})	0,0045 (1/°C) (Modjinou et al 2019 Mamun et al., 2022; Zhang et al., 2022)
PV panel referans test sıcaklığı, (T_{ref})	25 (°C)

PV panelin kalitesinin bir ölçüsü olarak tanımlanabilecek olan dolum faktörü (FF) ise Eş. (12) kullanılarak hesaplanabilir;

$$Dolum\ faktörü\ (FF) = \frac{V_{maks}I_{maks}}{V_{oc}I_{sc}} \quad (12)$$

PV panellerden elde edilebilecek en yüksek akım değeri I_{sc} , en yüksek gerilim değeri ise V_{oc} 'dir. Ancak, bu noktalardaki güç değeri ($P_{maks} = \dot{Q}_{elk}$) sıfırdır. Bundan dolayı en yüksek güç bulunurken $I * V$ değerinin en büyük olduğu noktadaki değer alınır. Yapılan deneylerde kullanılan PV panelin dolum faktörü, Eş. (12) ilkesine dayanarak ölçüm yapan MPPT cihazı ile 0,65 olarak tespit edilmiştir. Ölçülen bu değer literatürle karşılaştırıldığında da uyum sağladığı görülmüştür (Mamun et al., 2022, Sudhakar et al. 2021). Dolum faktörü PV hücrelerin üretiminin ve bağlantısının ne kadar iyi yapıldığının ve ayrıca direncin ne kadar düşük olduğunun bir göstergesidir. İdeal bir PV hücrenin FF değeri 1'dir. Ancak gerçek şartlarda FF değeri 1 olan bir PV panel bulmak olanaksızdır.

PV panelden elde edilen elektriksel ve ısısal gücün toplamının panel yüzeyine çarpan güneş ışınım yoğunluğuna oranı ise sistemin toplam verimini ifade eder. Toplam verim Eş. (13) yardımıyla hesaplanabilmektedir;

$$\eta_{toplam} = \frac{\dot{Q}_{ısı} + \dot{Q}_{elk}}{\dot{Q}_{güneş}} \quad (13)$$

Kanal hidrolik çapına göre tanımlanmış Reynolds sayısı ise Eş. (14) kullanılarak hesaplanmıştır;

$$Re = \frac{\rho_f u_{in} D_h}{\mu_f} \quad (14)$$

Reynolds sayısı akış türünün akış boyunca laminar veya türbülanslı olduğuna karar vermek amacıyla kullanılır. Burada kullanılan D_h ile gösterilen kanalın hidrolik çap değeri ise Eş (15) yardımıyla hesaplanmıştır;

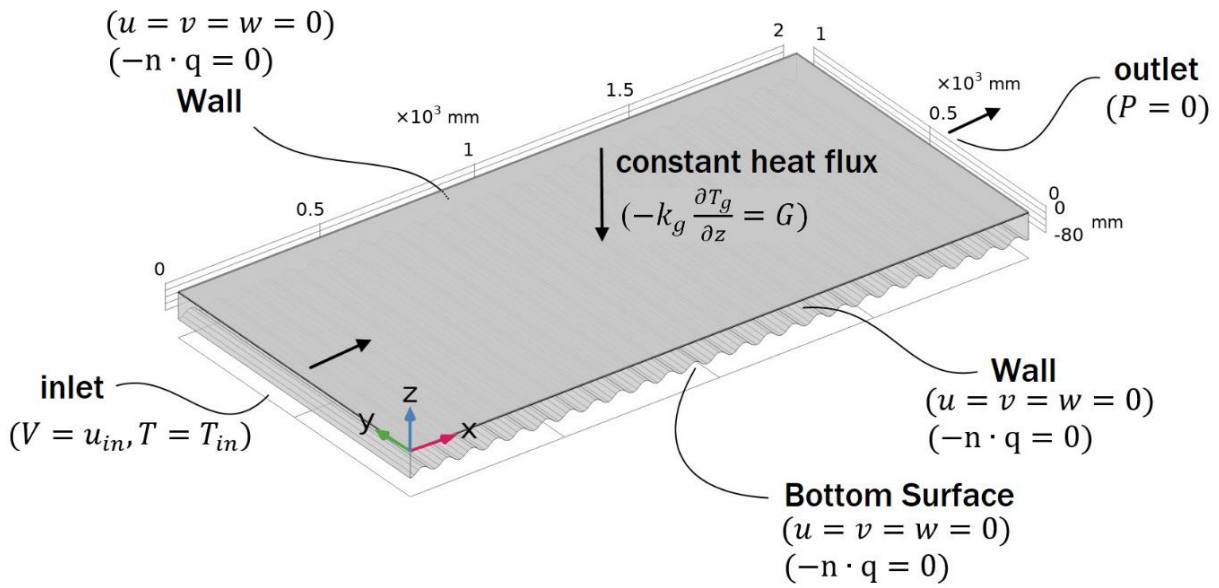
$$D_h = \frac{2 * H * W}{(H + W)} \quad (15)$$

Sayısal Prosedür

Matematiksel model

Sayısal çalışma kapsamında, deneysel çalışmaya konu olmayan veya sınırlı bir kapsamda dikkate alınan ışınım şiddeti, hava giriş hızı, çatı-PV panel mesafesi ve çatı

geometrisi gibi parametrelerin PV panel performansına olan etkileri COMSOL Multiphysics v5.4 ortamında geliştirilen simülasyon programı vasıtasıyla incelenmiştir. Sayısal çalışma, geliştirilen simülasyon programı tarafından üretilen sonuçların deneysel veriler ile kabul edilebilir bir uyum içerisinde olduğuna kanaat getirildikten sonra başlatılmıştır. Simülasyon programı, Fayaz vd. (2019) ile Shen vd. (2021) tarafından fotovoltaik termal sistemler (PVT) için önerilen matematiksel modellerin, PV panel ile çatı arasında oluşturulan, kanal içerisindeki hava akışı problemine uyarlanması ile geliştirilmiştir. Havanın kanala giriş ve çıkış yaptığı kanal yüzeyleri arasında kalan hacim, hesaplama bölgesi olarak kabul edilmiştir. Sayısal çalışmaya konu olan hesaplama bölgesi, boyutları ve sınır koşulları ile birlikte Şekil 33’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 33. Sayısal çalışmaya konu olan hesaplama bölgesi, boyutları ve sınır koşullarının şematik gösterimi.

Hava, kanala dış ortam koşullarında üniform bir hız ve sıcaklık değerinde girmekte, üst yüzeyi güneş kaynaklı sabit ısı akısına maruz kalan, alt ve yan yüzeyleri iyi bir şekilde yalıtılmış kanal boyunca ilerledikten sonra kanal çıkışından atmosfere boşalmaktadır.

Yukarıda detayları verilen problem, COMSOL Multiphysics v5.4 ortamında sürekli hal koşullarında, 3 boyutlu olarak ve k-epsilon (k-ε) türbülanslı akış modeli kullanılarak modellenmiştir. Simülasyon programında dikkate alınan kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemleri sırasıyla aşağıda Eş. (16), Eş. (17) ve Eş. (18) de sunulmuştur;

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (16)$$

$$\rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + (\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \mathbf{F} \quad (17)$$

$$\rho C_p u \cdot \nabla T_f = \nabla \cdot (k \nabla T_f) \quad (18)$$

Korunum denklemleri Şekil 33'de sunulan hesaplama bölgesi için Tablo 5. de verilen sınır koşulları gözetilerek çözülmüştür.

Tablo 5. Sınır Şartları.

Sınır	Şartlar
Kanal girişi (x=0)	$V = u_{in}, T = T_{in},$
Kanal sağ ve sol yüzeyi (y=0 ve y=W)	Kaymama koşulu ($u = v = w = 0$) Yalıtımlı ($-n \cdot q = 0$)
PV modül üst yüzeyi (z=0)	Sabit ısı akısı ($-k_g \frac{\partial T_g}{\partial z} = G$) Taşınım ile ısı kaybı [$-n \cdot q = h(T_a - T_g)$] Işınım ile ısı kaybı [$-n \cdot q = \varepsilon \sigma (T_a^4 - T_g^4)$]
PV modül altı-hava ara yüzeyi	Kaymama koşulu ($u = v = w = 0$), Katı-akışkan ara yüzeyinde ($k_f \frac{\partial T_f}{\partial n} = k_s \frac{\partial T_s}{\partial n}, T_f = T_s$)
Kanal alt yüzeyi	Kaymama koşulu ($u = v = w = 0$) Yalıtım ($-n \cdot q = 0$)
Kanal çıkışı (x=L)	Dış akış ($P = 0, \frac{\partial T_f}{\partial x} = 0, \frac{\partial u}{\partial n} = 0$)

Burada n , x , y , z eksenleri boyunca yüzeye dik gelen normali ifade eder.

Reynolds ortalama Navier-Stokes (RANS) yaklaşımı ile modellenen k - ε akış modeli, endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan türbülanslı akış modellerinden biridir. Model, süreklilik, momentum ve enerjinin korunumu denklemlerinin yanı sıra iki ek transport denklemi ve iki bağımlı değişken sunar (COMSOL User Guideline). Bunlar türbülanslı kinetik enerji k ve türbülanslı yayılım hızı ε 'dur. Türbülanslı viskozite (eddy viskozitesi) şu şekilde modellenmiştir;

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (19)$$

Burada C_μ bir model sabitidir. k için kinetik enerji denklemi ise Eş. (20) ile gösterilmiştir;

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (20)$$

Burada Pk ortalama hız gradyenleri ve kaldırma kuvvetleri nedeniyle oluşan türbülans kinetik enerji üretimidir. Son olarak ε için türbülans kinetik enerjisi kayıp oranı ise şu şekilde yazılabilir;

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (21)$$

Tablo 6. k- ε Model Sabitleri

Model sabiti	C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε
	0,09	1,44	1,92	1,0	1,3

Matematiksel model aşağıda ifade edilen sadeleştirmeler ve varsayımlar gözetilerek geliştirilmiştir.

- ✓ Akışkanın termo-fiziksel özellikleri sabittir.
- ✓ Akışkan kanala üniform bir hız ve dış ortam koşullarında girmektedir.
- ✓ Akış, sürekli, sıkıştırılamaz ve türbülanslıdır.
- ✓ Kanal üst yüzeyi güneş kaynaklı sabit ısı akısına maruz kalmaktadır.
- ✓ Kanal alt ve yanal yüzeyleri iyi bir şekilde yalıtılmıştır.
- ✓ PV panel üzerinde kirlenmenin söz konusu olmadığı kabul edilmiştir.

PV panel ve sandviç çatı malzemesinden oluşturulan akış kanalı sayısal olarak analiz edilirken “Conjugate Heat Transfer-Turbulent Flow Multiphysics Interface” modülü kullanılarak ısı transferi ve akışkan arasındaki bağıntı simüle edilmiştir. Bununla beraber akışkan akışı ve ısı transferi fizik modülüne “Nonisothermal Flow Multiphysics” modülü eklenerek bunlar eş zamanlı olarak çalıştırılmıştır.

Sayısal çalışma kapsamında PV panel performansına etkisi incelenen parametreler ve bu parametrelerin hangi değerlerinde analizlerin gerçekleştirildiği Tablo 9’da sunulmuştur.

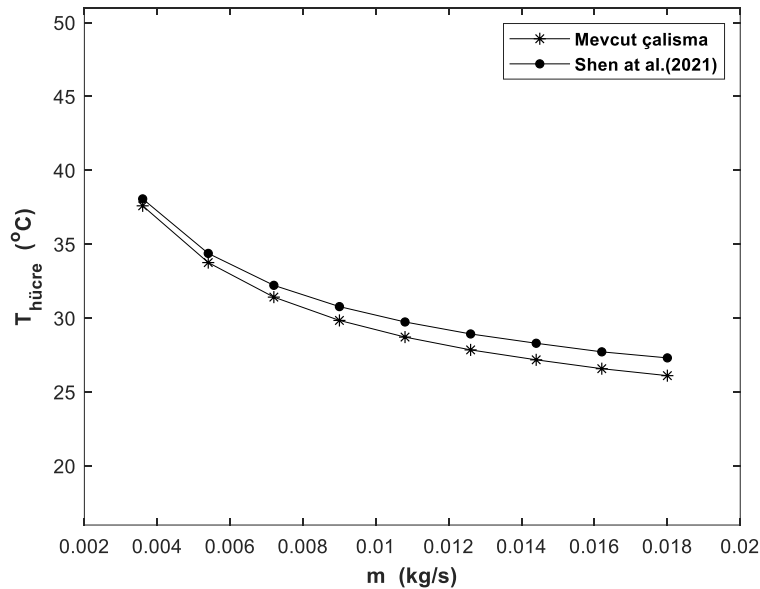
PV panel modellenirken her bir katman için Tablo 7’de belirtilen termo-fiziksel özellikler kullanılmıştır (Shen et al., 2021). Burada Etilen-Vinil-Asetat (EVA) katmanının geçirgenlik oranı yaklaşık olarak %100 olarak kabul edilmiştir (Fayaz et al., 2019).

Tablo 7. PV Panel Katmanları Ve Termo-Fiziksel Özellikleri (Shen et al., 2021).

Materyal (Katmanlar)	t [mm]	k [W/m°C]	ρ [kg/m ³]	C_p [J/kg°C]
Glass	3,2	1,8	2500	500
EVA	0,3	0,311	950	2090
Silikon	0,5	148	2329	700
Eva	0,3	0,311	950	2090
Tedlar	0,1	0,15	1200	1250

Sayısal Modelin Doğrulanması

Geliştirilen simülasyon programının ürettiği verilerin kabul edilebilir olup olmadıklarını test etmek için, ilk olarak program çıktıları Shen vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen sayısal çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Akışkan kütleli debisinin PV panel hücre sıcaklığına olan etkisi her iki çalışma için Şekil 34’de sunulmuştur. İncelenen kütleli debi aralığında her iki çalışma neticesinde elde edilen PV panel hücre sıcaklıkları arasında ortalama %3,1’lik bir sapma söz konusu iken bu sapma değeri artan kütleli debi ile birlikte artış göstererek maksimum durumda %4,4 değerine ulaşmıştır. Bu sapmanın temel olarak mesh kaynaklı sebeplerden dolayı meydana geldiği düşünülmektedir. Sonuç olarak, bulgular arasındaki maksimum sapma oranı gözetildiğinde geliştirilen simülasyon programının kabul edilebilir sonuçlar ürettiği değerlendirilmiştir.



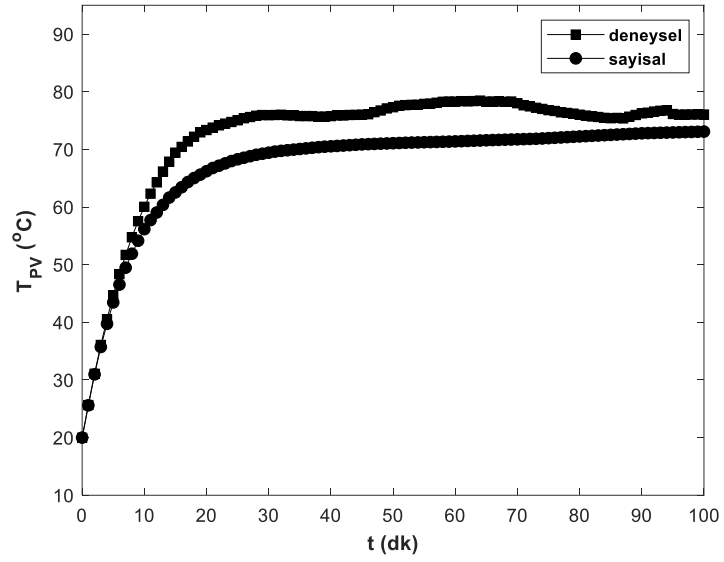
Şekil 34. Geliştirilen simülasyon programının ürettiği sonuçların literatür verileri ile karşılaştırılması.

İkinci ve son olarak zamana bağılı iki boyutlu ve sürekli hal koşullarında üç boyutlu olarak geliştirilen simülasyon programlarının çıktıları, bu çalışma kapsamında elde edilen deneysel veriler ile karşılaştırılmak suretiyle simülasyon programlarının kabul edilebilir sonuçlar üretip üretmedikleri test edilmiştir. Zamana bağılı iki boyutlu simülasyon, deneylerin gerçekleştirildiği 0,094 kg/s debide ve 855 W/m² sabit ısı akısı altında koşturulmuştur. Şekil 35.a'da PV panel alt yüzey ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi sunulmuştur. Analizin yaklaşık ilk 10 dakikalık bölümünde sayısal ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum söz konusu iken ilerleyen zamanla birlikte sonuçları arasında bir sapma söz konusu olmakta, sistemin kararlı hale gelmesiyle birlikte ise bu sapmanın maksimum değeri %3,89'e ulaşmakta ve de deneysel bulgular sayısal bulguların üstünde kalmaktadır. Bu sapmanın deneysel belirsizlikler ve güneş ışığına kıyasla tungsten halojen lambaların yaydığı kızılötesi ışıının yoğunluğunun daha yüksek olmasından (Ghadiri et al., 2015) kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca halojen lambalar kullanılarak kapalı ortamda gerçekleştirilen deneylerde ışıının yansıma kayıpları dış ortamdaki gerçek duruma kıyasla daha düşüktür (Mamun et. al., 2022). Bu da kapalı ortamda gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda PV panel yüzey sıcaklığının daha yüksek olmasının temel sebeplerinden biridir. Her iki çalışma için sürekli rejim koşulları yaklaşık t=20 dakikada oluşmaktadır. Şekil 35.b'de kanal çıkışındaki hava sıcaklığının zamana bağılı değişimi sunulmuştur. Verilerin alındığı yaklaşık ilk 5 dakikalık süre zarfında bulgular arasında iyi bir uyum gözlemlenmiştir. Ancak, ilerleyen zamanla birlikte bu uyum bozulmuştur. Kararlı hal koşullarına gelindiğinde ise bulgular arasında maksimum %0,79 oranında bir sapma söz konusu olmuştur. Uyumun bozulduğu noktadan sonra belirli bir süre boyunca deneysel bulgular sayısal bulgulara baskın gelmiştir. Bu durumun temel nedeni şu şekilde açıklanabilir. Laboratuvar ortamında güneş ışıını simülatörü kurulurken ön görülen ışıının değerinin sağlanabilmesi için halojen projektörler oldukça sık aralıklarla yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu durum PV panel yüzey sıcaklığındaki artışın hızlı bir şekilde meydana gelmesine sebep olmaktadır (Mamun et. al., 2022). PV panel sıcaklığının artmasıyla soğutucu havaya aktarılan ısı aynı oranda artmaktadır. Bu sebepten dolayı deneysel çalışmalarda sayısal çalışmalara kıyasla kanal çıkışındaki hava sıcaklığı belirli bir süre daha baskın gelmektedir.

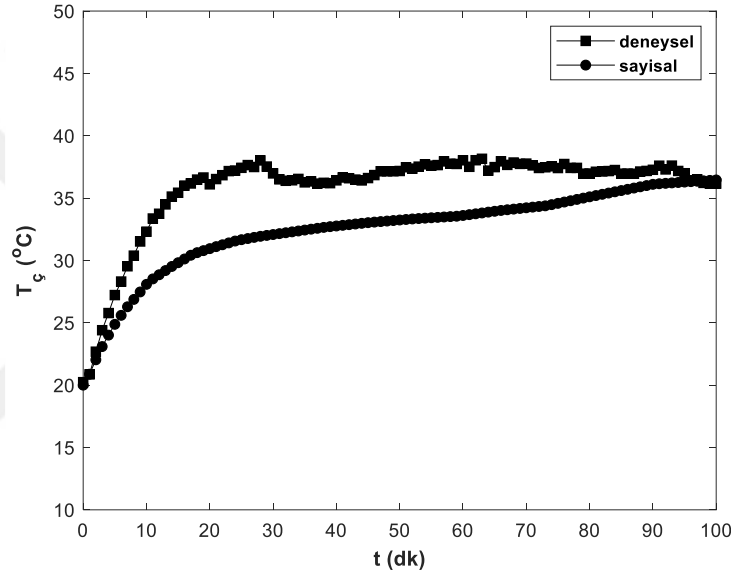
Üç boyutlu simülasyon programı ise kararlı hal koşullarında geliştirilmiş olup analizler 750 W/m² sabit ısı akısında, 0,41-1,24 m/s akışkan giriş hızı aralığında gerçekleştirilmiştir. Analizler neticesinde elde edilen bulguların deneysel veriler ile karşılaştırıldığı çalışma Şekil 35.c'de sunulmuştur. Düşük debi değerlerinde deneysel ve sayısal çalışma bulguları arasındaki sapma maksimum iken (%13,2) artan debi ile birlikte bu sapma miktarı minimum değeri olan %3,04'e inmektedir. Laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde farklı akışkan hızları için elde edilen PV panel ortalama alt yüzey sıcaklıklarının sayısal

bulgularından farklılık arz etmesinin temel sebebi gerçek güneş ışığına kıyasla tungsten halojen lambaların yaydığı kızılötesi ışıyım yoğunluğunun daha yüksek olmasıdır (Ghadiri et al., 2015). Bununla beraber laboratuvar ortamında, gerekli ışıyım değerinin sağlanabilmesi için halojen projektörlerin sık aralıklarla yerleştirilmesi ve PV panel yüzeyindeki ışıyım kayıplarının kapalı ortam koşullarından dolayı nispeten daha az gerçekleşmesi de deneysel çalışmalarda PV panel yüzey sıcaklığının sayısal çalışmalara kıyasla daha yüksek olmasının sebepleri arasında sayılabilir (Mamun et. al., 2022). Sonuç olarak, ölçüm kaynaklı deneysel hatalar ile sayısal modele ilişkin yapılan kabuller ve hesaplama hataları yukarıda ifade edilen sapma oranları ile birlikte değerlendirildiğinde sürekli rejim koşullarında geliştirilen üç boyutlu modelin problem fizikine etki eden parametreleri analiz etmek için kabul edilebilir sonuçlar ürettiği değerlendirilmiştir.

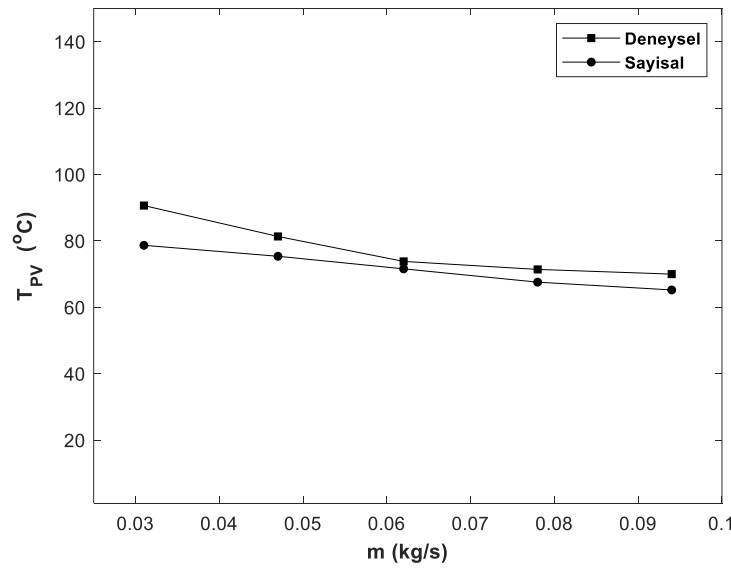




a)



b)



c)

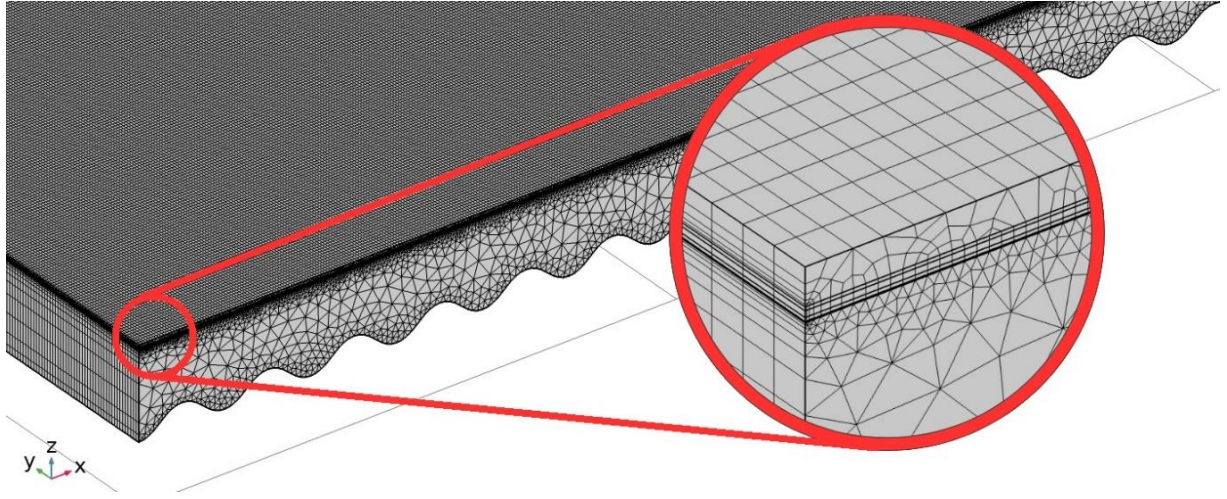
Şekil 35. Geliştirilen simülasyon programının kabul edilebilir sonuçlar üretip üretmediğinin deneysel veriler ile test edilmesi. a) PV panel alt yüzey sıcaklığının zamanla değişimi b) Kanal çıkışında hava sıcaklığının zamanla değişimi c) PV panel alt yüzey sıcaklığının akışkan debisi ile değişimi.

Çözüm Ağı (Mesh) Bağımsızlaştırma

Tablo 8. Eleman Sayısından Bağımsız Çözüm Elde Etme Testleri.

Hesaplama Hacmi Eleman sayısı	Re=9550		Re=13960	
	PV Panel Alt Yüzey Sıcaklığı (°C)	Hata (%)	PV Panel Alt Yüzey Sıcaklığı (°C)	Hata (%)
2268320	59,094	-	53,29	-
2835400	58,461	1,07	52,725	1,06
3686020	57,714	1,27	52,072	1,23
4536640	57,306	0,70	51,663	0,78

Eleman sayısından kaynaklı hataların sonuçlar üzerindeki etkisini göstermek ve eleman sayısından bağımsız analizler gerçekleştirmek için geliştirilen simülasyon programı en düşük ve en yüksek akışkan hız değerlerinde dört farklı eleman sayısı için koşturulmuştur. Analizler, oluklu çatı modelinde, 80 mm çatı-PV panel (D1) mesafesinde, 1000 W/m² ışınlım yoğunluğunda, 2,6 ve 3,8 m/s (Re=9550 ve Re=13960) hava giriş hızında ve 25 °C çevre sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. En yüksek ve en düşük akışkan giriş hız değerlerinde dört farklı eleman yoğunluğu için yapılan analizler neticesinde, PV panel ortalama alt yüzey sıcaklığı kontrol parametresi olmak üzere, elde edilen bulgular Tablo 8’de sunulmuştur. Ayrıca analizler boyunca kullanılan model üzerinde belirli sınırlar çerçevesinde free triangular, free quadral ve yüzeye dik eksenle süpürme (sweep) metoduyla oluşturulan geometrik yapıda çözüm ağları uygulanmıştır (Şekil 36) Tablo 8’e bakıldığında 3686020 ve 4536640 hacim eleman yoğunlukları arasında incelenen her iki hız değeri için PV panel ortalama alt yüzey sıcaklıklarında göz ardı edilebilir bir değişimin olduğu görülebilir. Bu aralıkta hesaplanan yüzde hatalar en az değere inmiştir. Bununla beraber 4536640 domain element yoğunluğunda daha yüksek işlemci enerjisi, hesaplama süresi ve bellek kapasitesi harcanmaktadır. Bu sebepten dolayı sayısal çalışmalarda analiz edilen matematiksel model için 3686020 domain element sayısında çözüm ağı yapısı kullanılmıştır.



Şekil 36. PV panel-çatı sisteminin sayısal çözüm eleman yapısı.

Parametrik Analizlerin Kapsamı

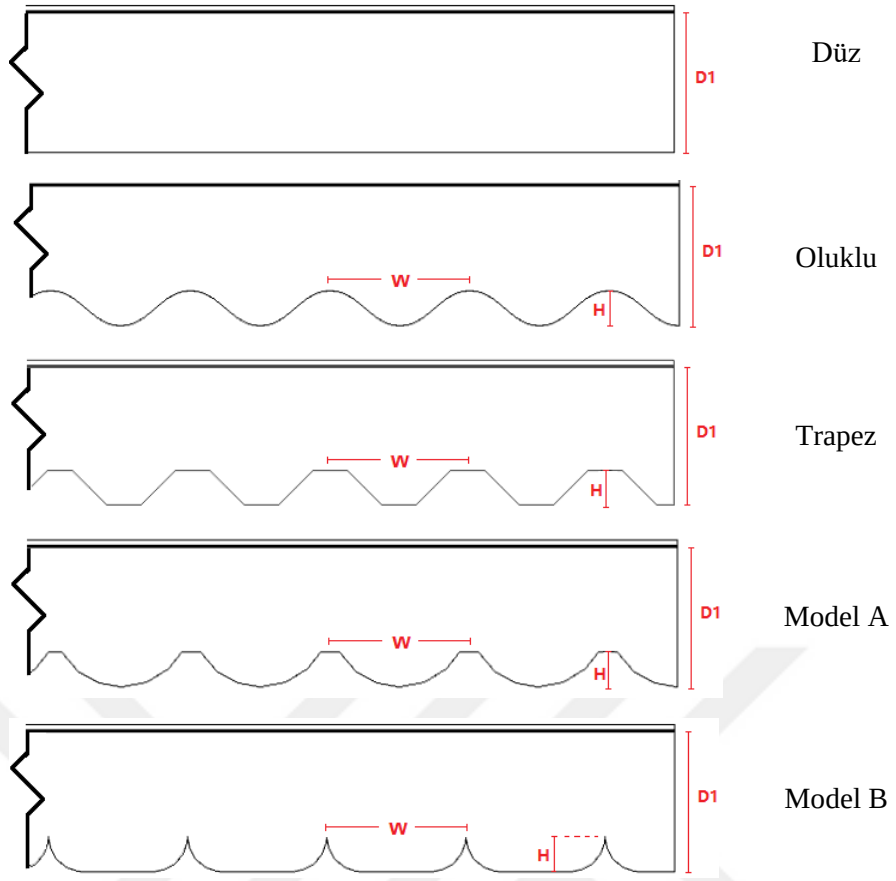
İncelemeye konu sistemin sayısal analizi için geliştirilen simülasyon programı, ilk olarak literatür ve bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğrulama testine tabi tutulmuştur. Bahse konu bu test işlemi ile geliştirilen simülasyon programının kabul edilebilir sonuçlar ürettiğine kanaat getirildikten sonra çalışmaya bu model üzerinden gerçekleştirilen parametrik analizler ile devam edilmiştir. Parametrik analizler kapsamında PV panel-çatı sisteminin ısı transferi ve akış davranışı değişken ışıınım şiddeti ve hava giriş hızı değerlerinde farklı çatı-PV panel mesafesi ve çatı geometrileri için ayrı ayrı sayısal olarak incelenmiştir. Burada PV panel-çatı- arası mesafe etkisi incelenirken, mesafeler ve sandviç çatı geometrileri ticari olarak erişilebilir konumda olan çatı yapıları ve bunların montaj özellikleri dikkate alınarak belirlenmiştir.

Ayrıca sayısal analizler belirli bir çatı geometrisi ve yüksekliği için hava giriş hızının 2,6-3,8 m/s, ışıınım şiddetinin 500-1200 W/m² aralığındaki değerlerinde yapılmıştır. Sayısal çalışma kapsamında etkisi incelenen parametreler ve bu parametrelerin değişim aralığı ile baz (referans) değerler Tablo 9’da verilmiştir. Sayısal analizler yapılırken incelenen parametre dışında kalan parametrelerin değerler sabit tutulmuş ve bu değerler söz konusu tabloda baz değerler olarak sunulmuştur. Örneğin değişken hava giriş hızı değerlerinde çatı geometrisinin etkisi incelenmek istendiğinde hava giriş hızı dışındaki diğer bütün parametrelerin baz değerleri kullanılmak suretiyle program farklı hava giriş hızı değerlerinde çalıştırılmıştır. Burada kullanılan hava giriş hız değerleri Erzurum geneli için ay bazında ortalama maksimum ve minimum rüzgar hızları referans alınarak belirlenmiştir. Yine aynı şekilde kullanılan baz değer hava giriş hızı ise Erzurum ili 2023 yılı ortalama rüzgar hızıdır (Anonim, 2023b). Diğer parametrik değerler ise mevcut literatürden alınmıştır (Teo et al 2012, Shen et al 2021, Aigbedion et al, 2023).

Tablo 9. Etkisi İncelenen Parametreler ile Bu Parametrelerin Değişim Aralığı ve Baz Değerleri.

Parametreler	Çalışma Aralığı	Baz Değer
Işınım şiddeti (G)	500-600-700-800-900-1000-1100-1200 (W/m ²)	1000 W/m ²
Hava giriş hızı (u_f)	2,6-2,8-3-3,2-3,4-3,6-3,8 (m/s)	3,2 m/s
Çatı-PV panel arası mesafe (D1)	(Sabit hız 3,2 m/s) 50-80-110-140-170-200-230 (mm) (Sabit debi 0,3 kg/s) 50-80-110-140-170-200-230 (mm)	80 mm
Çatı geometrisi	Düz, oluklu, trapez, Model A, Model B	Oluklu
Hatve yüksekliği (H)	10-15-20-25-30 (mm)	20 mm
Hatve mesafesi (W)	80-120-160-200-240 (mm)	80 mm

Parametrik analizlere konu olan sandviç çatı geometrilerinin şematik çizimleri Şekil 37’de gösterilmiştir. Burada her bir model için W mesafesi 80 mm, H yüksekliği 20 mm ve PV panel-çatı alt tabanı arasındaki mesafeyi temsil eden D1 derinliği ise 80 mm olmaktadır. Bununla beraber kanal genişliği 100 cm ve toplam kanal uzunluğu da 200 cm olarak alınmıştır. Piyasada ticari olarak satışı yapılan düz, oluklu ve trapez sandviç çatı geometrilerinin yanı sıra Model A ve Model B olarak isimlendirilen çatı geometrileri, akışı yönlendirme kabiliyetinden hareketle etkin soğutma yoluyla PV panel ortalama alt yüzey sıcaklığını düşüreceği ve dolayısıyla PV panelin elektriksel performansını arttıracak hipotezi doğrultusunda tasarlanmıştır.



Şekil 37. Etkisi incelenen sandviç çatı modelleri.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

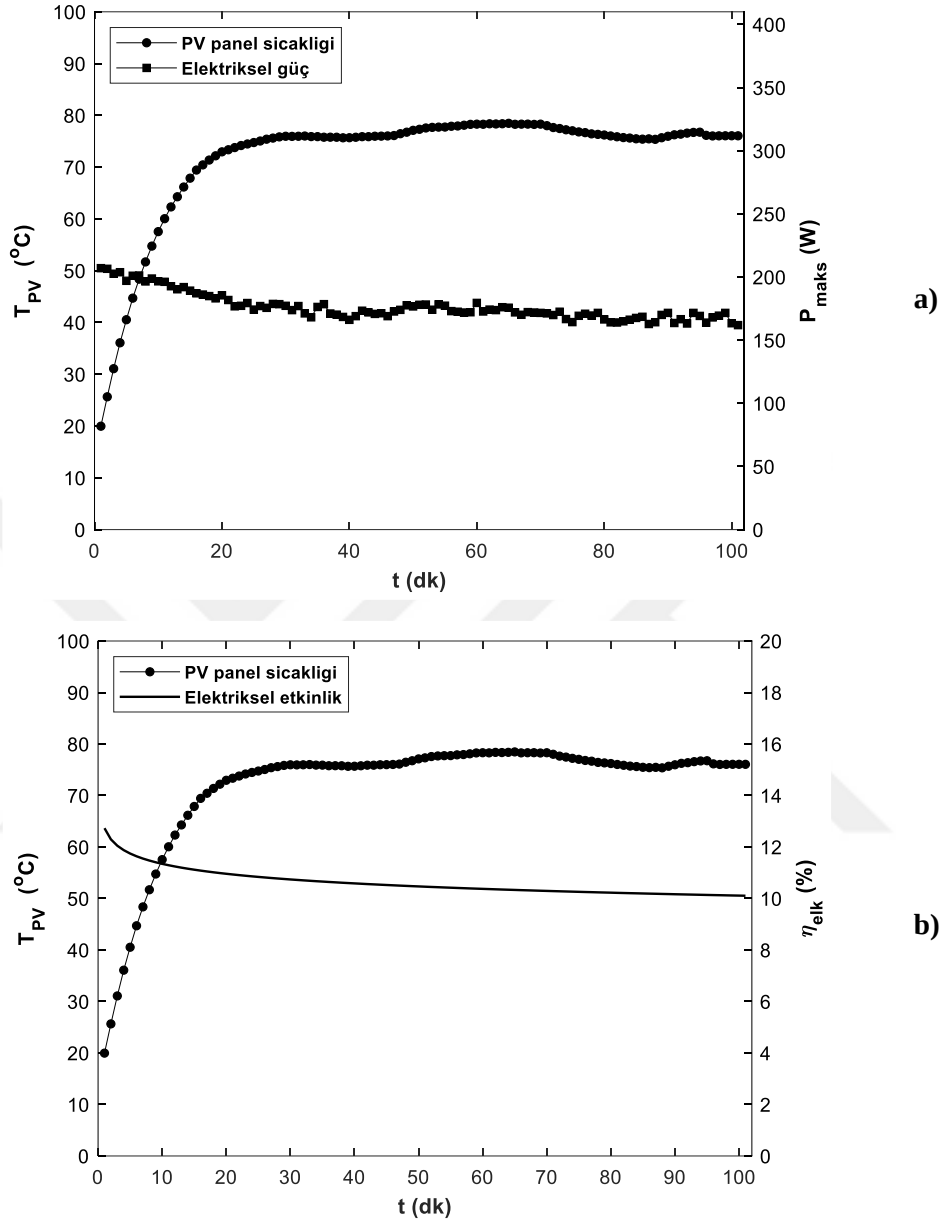
PV Panel-Çatı Sisteminin Parametrik Analizi

PV-Panel-çatı sisteminde PV panel performansı farklı çalışma ve tasarım koşulları altında COMSOL Multiphysics ortamında geliştirilen simülasyon programı vasıtasıyla sayısal olarak incelenmiş olup elde edilen sonuçlar bu bölümde sunulmuştur. Sayısal çalışma kapsamında PV panelin elektriksel ve ısı verimliliği incelenirken sırasıyla ışıınım şiddeti, hava giriş hızı, çatı-PV panel arası mesafe ve çatı geometrisi faktörleri incelenmiştir. Ayrıca, PV panel yüzey sıcaklığı ile elektriksel güç üretimi arasındaki ilişki deneysel olarak incelenmiş ve elde edilen bulgular bu bölümde sunulmuştur.

PV Panel Sıcaklığının Elektriksel Verimliliğe Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi

PV hücreler, üzerlerine düşen güneş ışınlarının büyük bir kısmını emme kabiliyetine sahip olsalar da ticari uygulamalarda hücre teknolojisine bağlı olarak bu enerjinin sadece %9-20'lik bir kısmını elektrığe dönüştürebilmektedirler (Sherwani et al., 2010a; Shukla et al., 2017a). Panel üzerine düşen güneş ışınlarının bir kısmı da panel yüzeyinden geri yansır. Yansıyan güneş ışınları sistemi etkilemez ve yansıma kaybı olarak adlandırılır (Elavarasan et al, 2024). Söz konusu enerjinin geriye kalan kısmı ise panel üzerinde istenmeyen ısıya dönüşür ve panelin yüzey sıcaklığını yükseltir. Panel yüzey sıcaklığının artması hücrelerde elektronların hareketini önleyici bir direnç oluşturur. Bu da hücrenin elektriksel verimliliğini olumsuz yönde etkiler (Sharaf et al., 2022a). Bu sebepten dolayı PV panellerin soğutulması elektriksel verimliliğin artırılması bakımından büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle, deneysel olarak yürütülen çalışma kapsamında artan hücre sıcaklığının PV panelin elektriksel güç çıkışında yaratmış olduğu etki incelenmiş ve aralarındaki ilişki Şekil 38'de sunulmuştur. Yapılan deneylerde, 20 °C oda sıcaklığında, 855 W/m² ışıınım değerine maruz bırakılan mono-kristal PV panelin alt yüzeyinden 0,094 kg/s kütleli debide hava geçirilerek panel sıcaklığının zamanla değişimi gözlemlenmiştir. Aynı zamanda MPPT güç ölçüm cihazıyla birer dakikalık zaman aralıklarında ölçüm yapılarak elde edilen elektriksel güç çıktıları kaydedilmiştir. Şekil 38'de gösterildiği üzere artan yüzey sıcaklığı ile elektriksel performans arasında doğrudan bir ilişki vardır. PV panelin güneş ışınlarına maruz kalmasıyla birlikte yaklaşık t=20 dakikaya kadar hücre sıcaklığı zamanla artış göstermiş, sonrasında sürekli rejim koşullarına ulaşmıştır. Başlangıçta hücre sıcaklığı 20 °C iken ilerleyen zamanla birlikte bu sıcaklık değeri yaklaşık 76 °C ulaşmış ve sonrasında hemen hemen sabit kalmıştır. PV panel yüzey sıcaklığı yükselirken elektriksel güç çıktısı 207 W değerinden 161 W değerine kadar düşmüştür. Diğer taraftan,

yapılan deney esnasındaki ani sıcaklık artışlarından kaynaklı anlık belirgin güç düşüşleri de gözlemlenmiştir. Son olarak elektriksel verim ise bu sıcaklık yükselişinden kaynaklı %12,11'den %10,04'e düşmüştür.



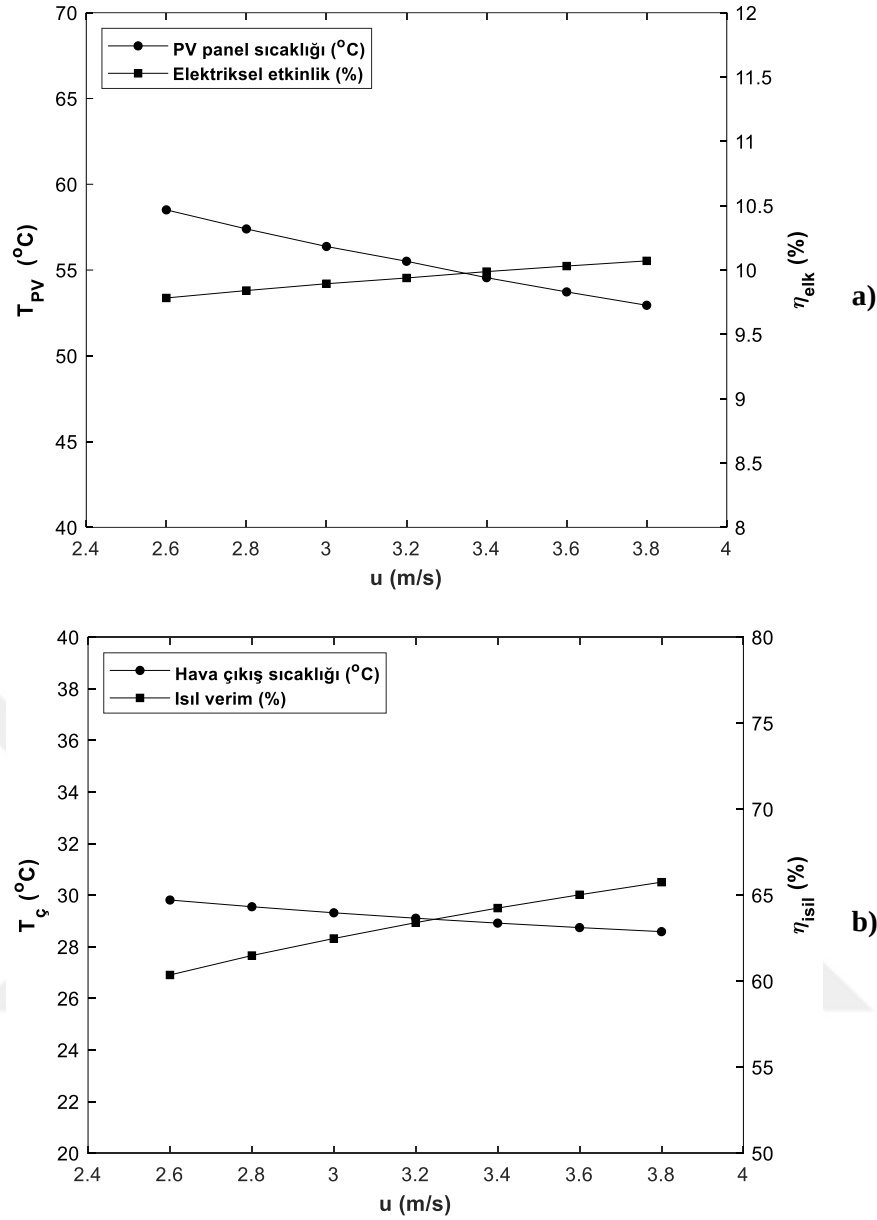
Şekil 38. Hücre sıcaklığının artmasından kaynaklı a) elektriksel güç çıktısında ve b) elektriksel etkinlikte meydana gelen değişim.

Hücre sıcaklığının artmasıyla beraber elektriksel güç çıkışı ve dolayısıyla elektriksel verimin azalmasının temel sebebi sıcaklık artışının PV panel voltajında ve dolum faktöründe önemli bir düşüşe sebebiyet vermesidir (Bahaidarah et al 2014, Baloach et al 2015, Nahar et al., 2017). Sonuç itibariyle elde edilen deneysel veriler ışığında PV panel sıcaklığının her 1 °C artışıyla elektriksel güç çıktısında ortalama 0,82 W'lık bir düşüş meydana geldiği tespit edilmiştir. Hücre sıcaklığının artmasından kaynaklı PV panel veriminin düşmesinin yanı sıra meydana gelen ısı gerilmeleri nedeniyle PV hücrenin ömrü de kısalmaktadır (Das et al., 2019;

Sultan et al., 2020). Bu nedenle PV hücre sıcaklığını uygun soğutma yöntemleri kullanılarak belirli bir değerin altında tutmak büyük önem taşımaktadır.

Rüzgar Hızının PV Panel Performansına Etkisi

Akışkan hareketi temel olarak atalet kuvvetler ve viskoz kuvvetlerin etkisiyle karakterize edilir. Bu iki kuvvetin birbirine oransal baskınlığı akışkanın akış ve ısı transferi özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Reynolds sayısı atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı olan boyutsuz bir sayıdır. Düşük Re sayısında akışkan viskoz kuvvetlerin etkisindeyken daha yüksek Re sayısında akışkan hareketi temel olarak atalet kuvvetler tarafından kontrol edilmektedir. Bu nedenle Re sayısı soğutucu akışkanın (havanın) termal davranışını ve dolayısıyla PV panel performansını belirgin bir şekilde etkilemektedir. Bu kapsamda PV panel-çatı arasında akmakta olan havanın kanala girişteki hız değerinin PV panel performansı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla oluklu sandviç çatı geometrisi, 80 mm panel-çatı mesafesi ve 1000 W/m^2 ısıtım şiddetinde 2,6-3,8 m/s rüzgar hızı aralığında parametrik sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu hız değerlerinde hidrolik çapa dayalı Re sayıları 25000-36000 aralığında değişmektedir. Söz konusu Re sayı aralığında akışın türbülanslı olmasından dolayı COMSOL Multiphysics ortamında geliştirilen simülasyon programı türbülanslı k- ϵ akış modeline dayanmaktadır. Hava giriş hızı ile PV hücre sıcaklığı ve elektriksel verim değişimi ve yine hava giriş hızı ile hava çıkış sıcaklığı ve ısı verim değişimi sırasıyla Şekil 39.a ve b’de gösterilmektedir.



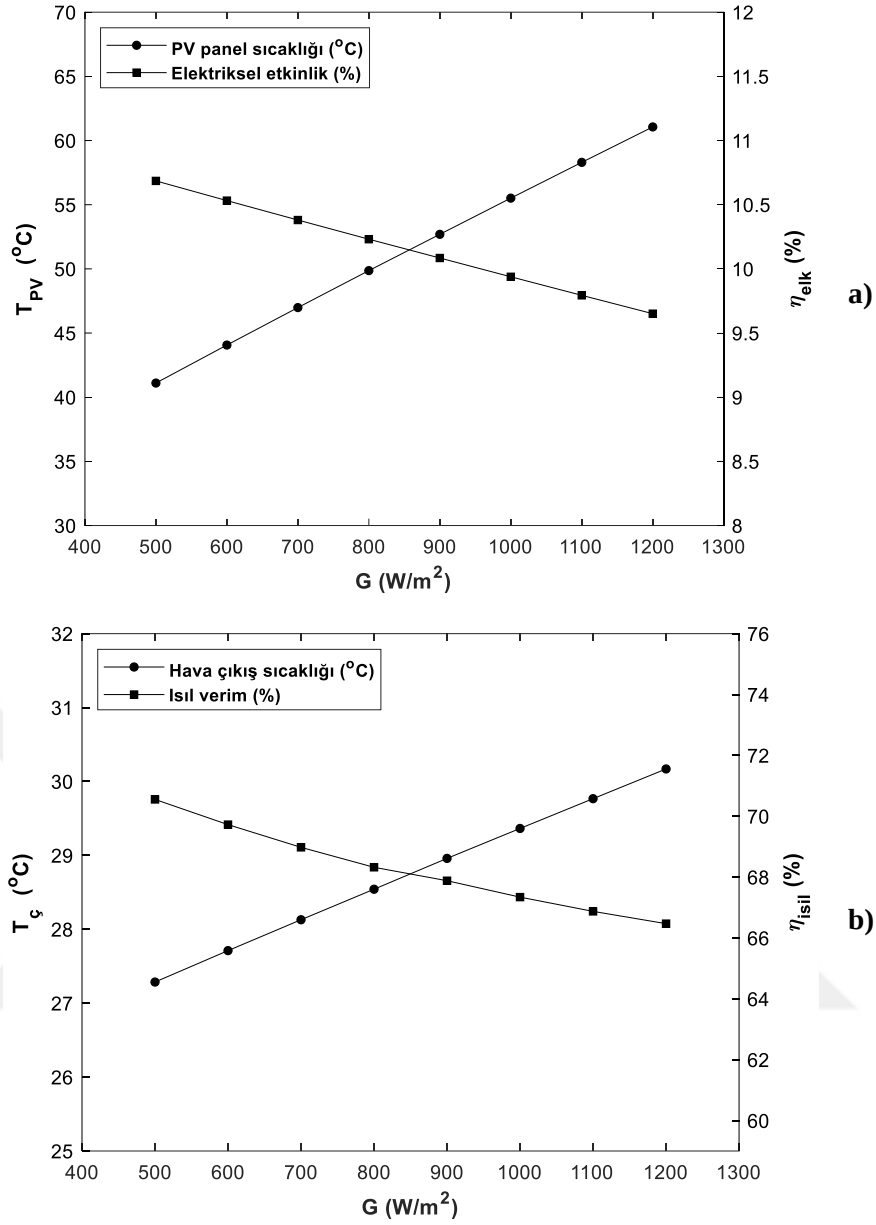
Şekil 39. Rüzgar hızının PV sistemin a) elektriksel performansına b) ısı performansına olan etkisi.

Şekil 39.a’da görüleceği üzere hava giriş hızı 2,6 dan 3,8 m/s değerine yükselirken ortalama PV panel yüzey sıcaklığı 58,50 °C’den 52,94 °C’ye düşmüş ve elektriksel verim değeri ise %9,78’den %10,07’ye yükselmiştir. Bu değişim lineer olarak gerçekleşmektedir. Rüzgar hızındaki her 0,2 m/s’lik artış ortalama olarak 0,92 °C’lik bir sıcaklık düşümüne ve %0,4 elektriksel verim artışına sebep olmaktadır. Daha yüksek rüzgar giriş hızlarında ve buna bağlı olarak daha yüksek Re değerlerinde PV panel ile soğutma havası arasında daha büyük bir taşınım ısı transferi katsayısı oluşacaktır. Bu nedenle birim zamanda soğutma havasına daha fazla ısı aktarılmış ve bu da daha düşük bir PV panel yüzey sıcaklığına yol açmıştır. Dolayısıyla daha yüksek Re değerlerinde taşınım ile ısı transferi daha etkin bir şekilde gerçekleşecektir. Akışkan hızının artması ile birlikte hem taşınım ile ısı transferi katsayısının değeri artmış olacak

hem de akışkan sıcaklığının daha düşük kalmasından dolayı PV panel yüzeyi ile akışkan arasındaki sıcaklık farkı yükselmiş ve dolayısıyla ısı transfer hızı iyileşmiş olacaktır. Bu sebeple daha düşük rüzgar hızlarındaki duruma göre PV panel ortalama yüzey sıcaklığı daha düşük olacaktır. Bununla beraber kanal hava giriş hızının, hava çıkış sıcaklığına ve ısı verimliliğe olan etkilerine ilişkin elde edilen bulgular Şekil 39.b’de sunulmuştur. Hava giriş hızı 2,6 dan 3,8 m/s değerine yükselirken ortalama kanal hava çıkış sıcaklığı 29,81 °C’den 28,58 °C’ye düşmüş, ısı verim ise %60,35’den %65,75 değerine yükselmiştir. Bu değişimler PV hücre sıcaklığı ve elektriksel verim değerlerinde olduğu gibi lineer olarak gerçekleşmektedir. Hava giriş hızının artmasıyla beraber kütleli debi de artacak ve dolayısıyla PV panelden soğutma havasına ısı formunda daha fazla enerji transferi gerçekleşecektir. Bununla beraber çevre ortama olan ısı kayıpları da azalacaktır. Bu sebepten dolayı sabit giriş sıcaklığında hava çıkış sıcaklığı yükselmiş ve dolayısıyla ısı verim oranı da artmıştır.

Güneş Işınım Şiddetinin PV Panel Performansına Etkisi

Güneş ışınım şiddetinin PV panelin elektriksel ve ısı verimine olan etkisi bu bölümde incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında baz değerler olarak belirlenen oluklu çatı geometrisi için 80 mm panel-çatı mesafesi ve 3,2 m/s hava giriş hızı için ışınım şiddetinin farklı değerlerinde (500-1200 W/m²) bir takım sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yürütülen sayısal çalışmalar sonucunda PV panel sıcaklığının, hava çıkış sıcaklığının, elektriksel verimin ve ısı verimin ışınım şiddeti ile değişimi Şekil 40’da sunulmuştur.



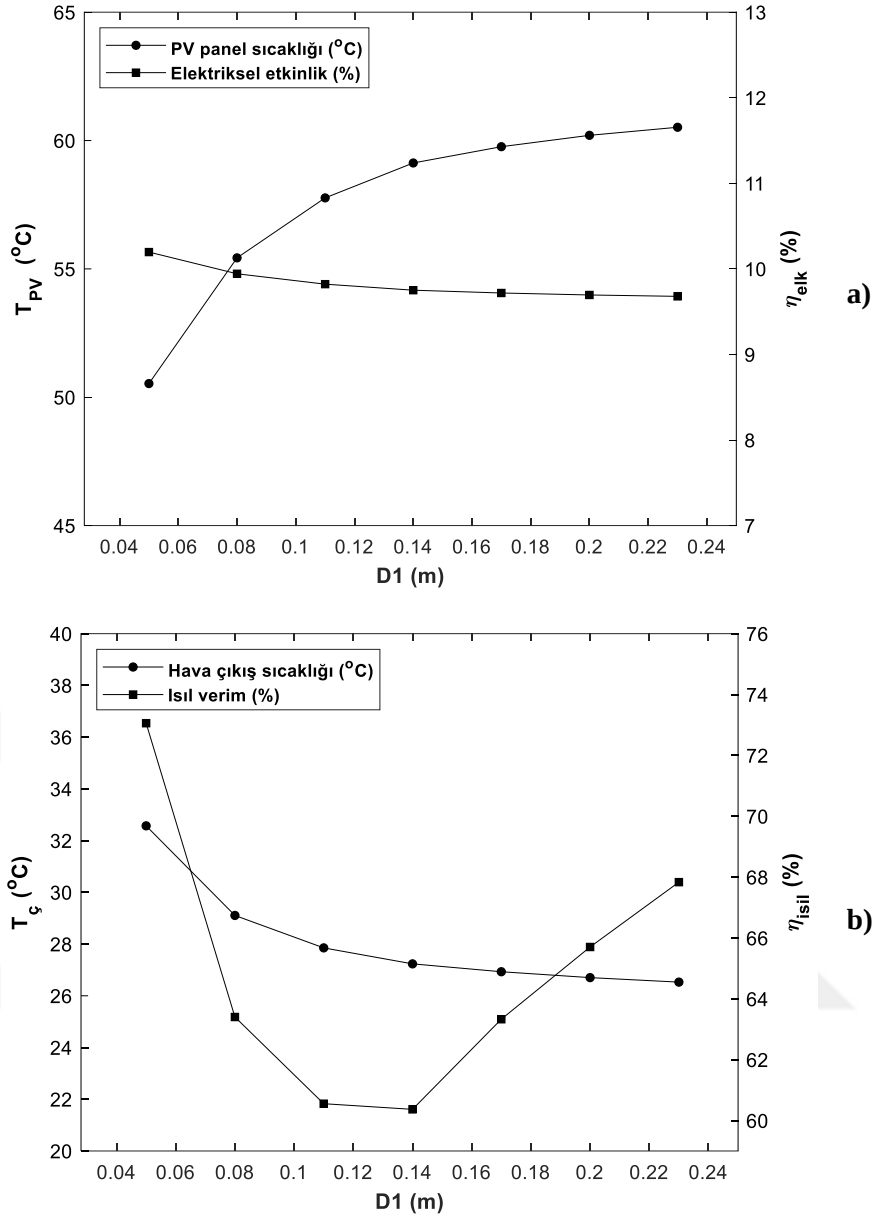
Şekil 40. Güneş ışınlam şiddetinin a) elektriksel ve b) ısı performansına olan etkisi.

Güneş ışınlam şiddetinin artmasıyla birlikte PV panel ortalama yüzey sıcaklığının arttığı, elektriksel verimin ise düştüğü Şekil 40.a'dan net bir şekilde görülebilmektedir. Işınlam şiddeti 500 W/m^2 'den 1200 W/m^2 'ye yükselirken ortalama PV panel yüzey sıcaklığı 41,1 °C'den 61 °C'ye yükselmiş, elektriksel verim ise %10,6 dan %9,6 seviyesine düşmüştür. Işınlam şiddeti arttırıldığında elde edilen elektriksel güç artmasına rağmen verimde bir düşüş meydana gelmektedir. Her 100 W/m^2 ışınlam şiddeti artışında elektriksel verimin %0,14 seviyesinde düşüş, PV panel yüzey sıcaklığının ise 2,84 °C yükseliş gösterdiğini söylemek mümkündür. Sonuç olarak güneş ışınlam şiddetinin artması ile birlikte sabit hava hızında yeterli düzeyde soğutma yapılamadığından panel sıcaklığı yükselmekte ve neticesinde elektriksel verim düşmektedir.

Işınım şiddetinin havanın çıkış sıcaklığı ile ısı verime olan etkileri Şekil 40.b’de gösterilmiştir. Işınım şiddeti 500 W/m^2 ’den 1200 W/m^2 ’ye yükselirken ortalama hava çıkış sıcaklığı $27,28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ’den $30,16 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ’ye yükselmiş, ısı verim ise %70,55 den %66,47 seviyesine düşmüştür. Panel yüzeyine uygulanan ısıtım şiddetinin artması panel tarafından depo edilen ısı enerji miktarının ve dolayısıyla panel sıcaklığının artmasına sebep olmaktadır. Artan PV panel ortalama yüzey sıcaklığından dolayı ısı transfer hızı artmakta ve neticesinde havanın çıkış sıcaklığı yükselmektedir. Ancak buna rağmen sistemin yüzde olarak ısı verimliliği yine de düşmüştür. Bu durum PV panel yüzeyine uygulanan ve panel yüzey sıcaklığını arttıran ısıtım şiddetinin soğutucu akışkan ile ortamdan uzaklaştırılan kısmından daha fazlasının ısıtım ve taşınım kayıpları olarak ortam havasına aktarılmış olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sebepten dolayı artan ısıtım şiddeti ile birlikte akışkana geçen ısı enerjide aynı oranda bir artış elde edilememiş ve bunun sonucunda ısı verimde bir düşüş yaşanmıştır.

PV Panel-Çatı Arasındaki Mesafenin PV Panel Performansına Etkisi (Sabit akışkan hızı)

Etkin rüzgar hızının yanı sıra PV panel-çatı arasındaki mesafe de PV panel soğuma performansına etki eden önemli bir parametredir. Bu nedenle çalışmanın bu bölümünde 1000 W/m^2 ısıtım şiddeti ve $3,2 \text{ m/s}$ sabit rüzgar hızında farklı PV panel-çatı arası mesafe değerleri için ($0,05\text{-}0,23 \text{ m}$ aralığında) sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Burada kanal kesit alanının değişmesinden dolayı giriş havasının kütleli debisinin değiştiği unutulmamalıdır. Şekil 41.a’da her iki yapı arasındaki mesafenin artmasından kaynaklı PV panel ortalama yüzey sıcaklığı ve elektriksel verimde meydana gelen değişim gösterilmiştir. Kanal yüksekliği arttıkça PV panel ortalama yüzey sıcaklığının arttığı ancak bu artışın artan kanal yüksekliği ile birlikte bir limit değere yaklaştığı görülmektedir. Belirli bir yükseklikten sonra çatı geometrinin akış karakteristiğine olan etkisinin azalması bu durumun temel sebebidir. Bu mesafenin çok daha fazla artması durumunda çatı geometrisi PV panel sıcaklığına hiç etki göstermeyecek ve bu mesafenin etkisi de göz ardı edilebilecektir. PV panel ortalama yüzey sıcaklığının göstermiş olduğu davranışın tam tersi olarak artan mesafe elektriksel verimde bir düşüşe sebep olmaktadır. Ancak bununla beraber bu düşüş PV panel yüzey sıcaklığında olduğu gibi artan mesafe ile birlikte limit bir değere yaklaşmıştır. Düşük PV panel-çatı mesafelerinde çatı geometrisinin etkisi daha fazla hissedilerek PV panel yüzeyine çarptırılan havadan ve akış karıştırma etkisinden dolayı daha etkin bir soğutma elde edilecektir. Bu sayede PV panel ortalama yüzey sıcaklığı göreceli olarak daha düşük kalacaktır. Sıcaklığın düşmesi ise elektriksel verimlilik üzerinde olumlu bir etki yaratacaktır.



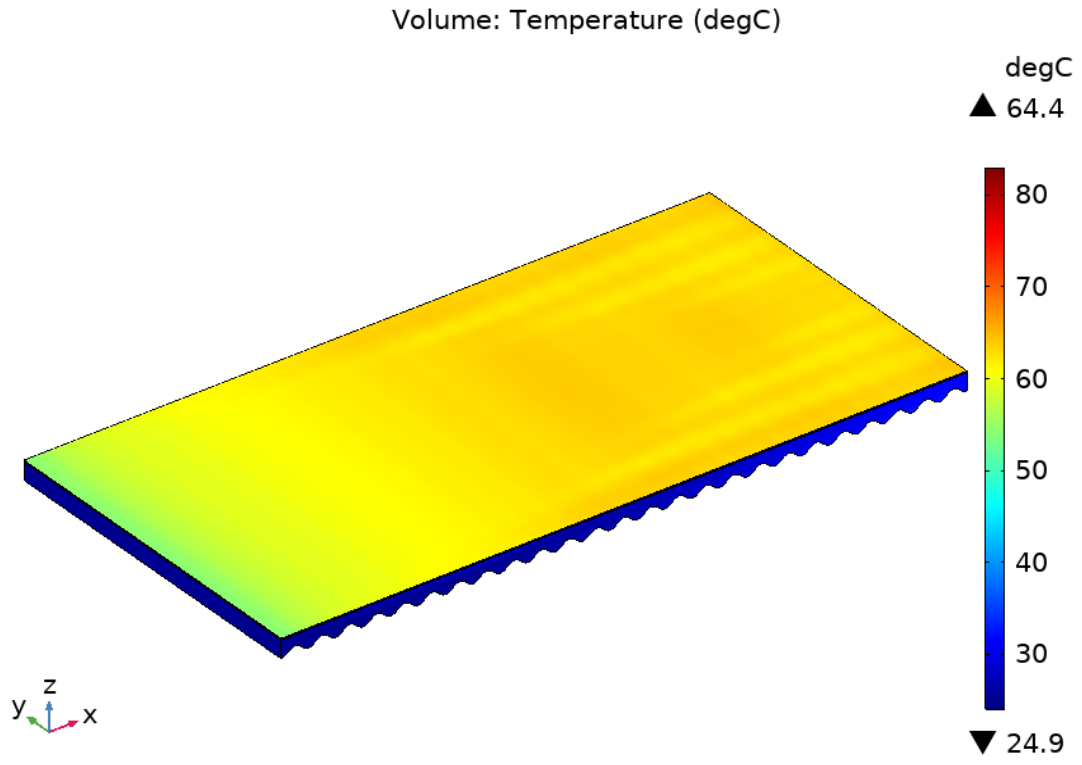
Şekil 41. PV panel-çatı arasındaki mesafenin sabit akışkan hızında a) elektriksel ve b) ısı performansına olan etkisi.

Şekil 41.b’de hava çıkış sıcaklığının ve sisteme ait ısı verimin PV panel-çatı arasındaki mesafe ile olan ilişkisi gösterilmektedir. Her iki yapı arasındaki mesafe arttıkça hava çıkış sıcaklığının düşüş gösterdiği ancak bu düşüş hızının artan mesafe ile yavaşladığı gözlemlenmiştir. Mesafe arttıkça çatı geometrinin akış karakteristiğine olan akış karışması ve PV panel yüzeyine akış yönlendirme gibi etkilerinin azalması akışın ısı uzaklaştırma kabiliyetinin azalmasına sebep olacaktır. Bu durum sonucunda kanal çıkışındaki akışkan sıcaklığı mesafe arttıkça azalmaktadır. Diğer taraftan ısı verim artan mesafe ile birlikte önce düşüş göstermiş, 0,14 m mesafede minimum değerine ulaşmış sonrasında ise tekrardan artmaya başlamıştır. Eş. (5) den anlaşılacağı üzere soğutucu akışkan tarafından birim zamanda transfer edilen ısı miktarı sadece hava giriş ve çıkış sıcaklıklarına bağlı olmayıp doğrudan kütleli debi

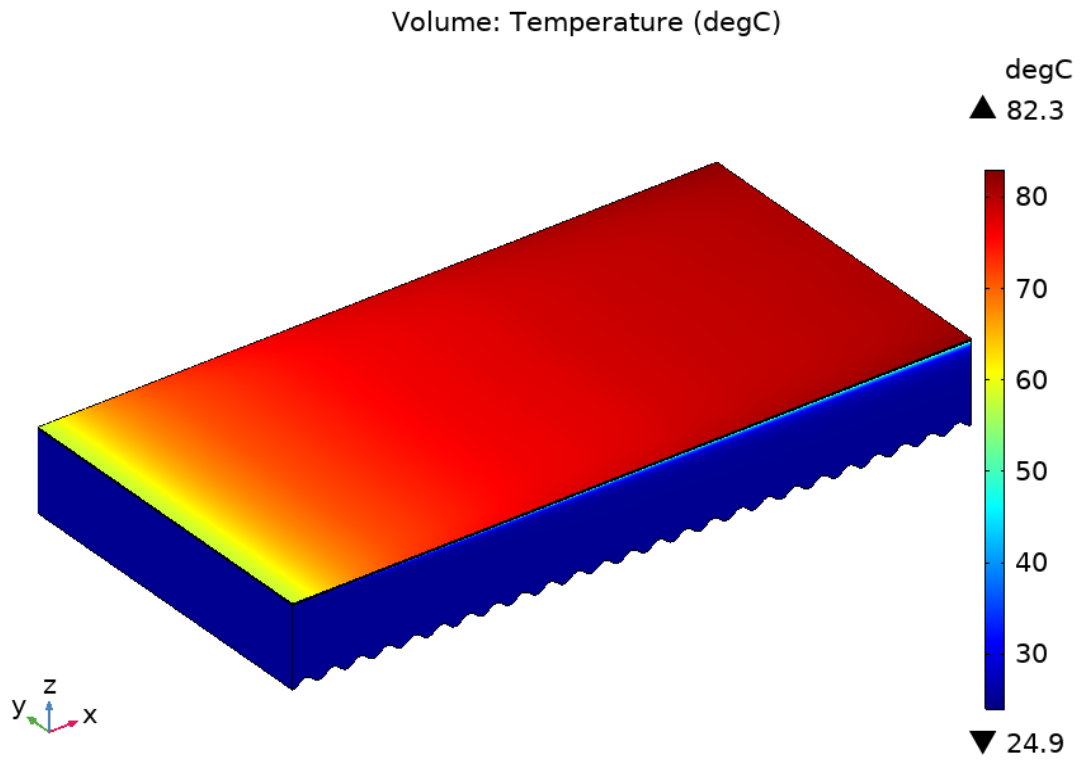
ile de ilişkilidir. Analizler 3,2 m/s hava giriş hız değerinde yapılmış olup artan mesafe ile hidrolik çap değiştiğinden dolayı akışkan kütsel debisi de değişmektedir. Bu durum göz önünde bulundurularak 0,05-0,14 m aralığında bakıldığında sabit akış hızında PV panel-çatı arasındaki mesafe arttıkça akış debisi yükselmesine rağmen akışkan giriş ve çıkış sıcaklıkları farkının da giderek azalmasından dolayı bu aralıkta ısı verimlilik düşmektedir. Bundan sonraki aşamada 0,05-0,14 m aralığında grafiğe bakıldığında ise giriş ve çıkış sıcaklıkları farkının nispeten daha düşük seviyelere gerilediği görülüyor olsa bile PV panel-çatı arasındaki bu mesafelerde kütsel debinin çok daha yüksek seviyelere yükseldiği Eş. (3) kullanılarak hesaplanabilir. Kütsel debide yaşanan bu yüksek artış oranı nedeniyle akışkanın uzaklaştırdığı ısı enerji artmakta ve buna bağlı olarak ısı verimlilik bu aralıkta yükselmektedir.

Şekil 42’de 0,05 m ve 0,23 m kanal yüksekliklerinde PV panel-çatı sistemindeki sıcaklık dağılımları gösterilmektedir. Şekil 43’de ise yine söz konusu kanal yükseklikleri için akış hızı ve akım çizgileri sunulmuştur. Şekil 42’den görülebileceği üzere 0,05 m yüksekliğindeki durumda PV panel ortalama yüzey sıcaklığı belirgin bir şekilde daha düşüktür. Ayrıca Şekil 43’de gösterilen akım çizgilerinin renk skalasına bakıldığında 0,05 m yüksekliğinde panele yakın yüzeyde hava akış hızı nispeten daha yüksektir. Daralan kesitte hava akışı hızındaki artış daha belirgin hissedilmektedir. Bu sayede yükselen hava hızıyla paralel olarak artan Reynolds değeri ile birlikte hava, daha fazla ısı uzaklaştırma kabiliyetine sahip olacaktır.

Bu durum aynı zamanda Şekil 41.b’de gösterildiği üzere daha düşük PV panel-çatı arası mesafelerde hava çıkış sıcaklığının daha yüksek olmasının sebebini de açıklamaktadır. Panele yakın yüzeyde hava akış hızının daha yüksek olmasından dolayı panel sıcaklığı daha düşüktür. Ayrıca kanalın alt yüzeyindeki sandviç çatı geometrisinin akış yönlendirmesinden dolayı panele çarpan hava akışının etkisi daha belirgin hissedilmektedir. Bu geometri akışın dalgalanmasını ve bu sayede PV panel alt yüzeyine çarpan havanın daha etkin bir soğutma performansı göstermesini sağlamaktadır. Diğer bir ifadeyle akış halindeki havanın sürekli olarak yukarı ve aşağı hareketi, dar kesitte havanın daha şiddetli bir şekilde üst yüzeye sürekli olarak çarpmasıyla sonuçlanacak ve bu da akışın yüzeye yakın ısı transferi sınır tabakasını yok ederek soğutma kanalındaki ısı transferi performansını artıracaktır (Shen et al., 2021). Alt yüzeydeki çatı geometrisinin üst yüzeydeki PV panelin soğutulmasında gösterdiği bu etkinin artırılması amacıyla daha etkin özel tasarım çatı geometrileri geliştirilerek sonraki bölümde tartışılmıştır.

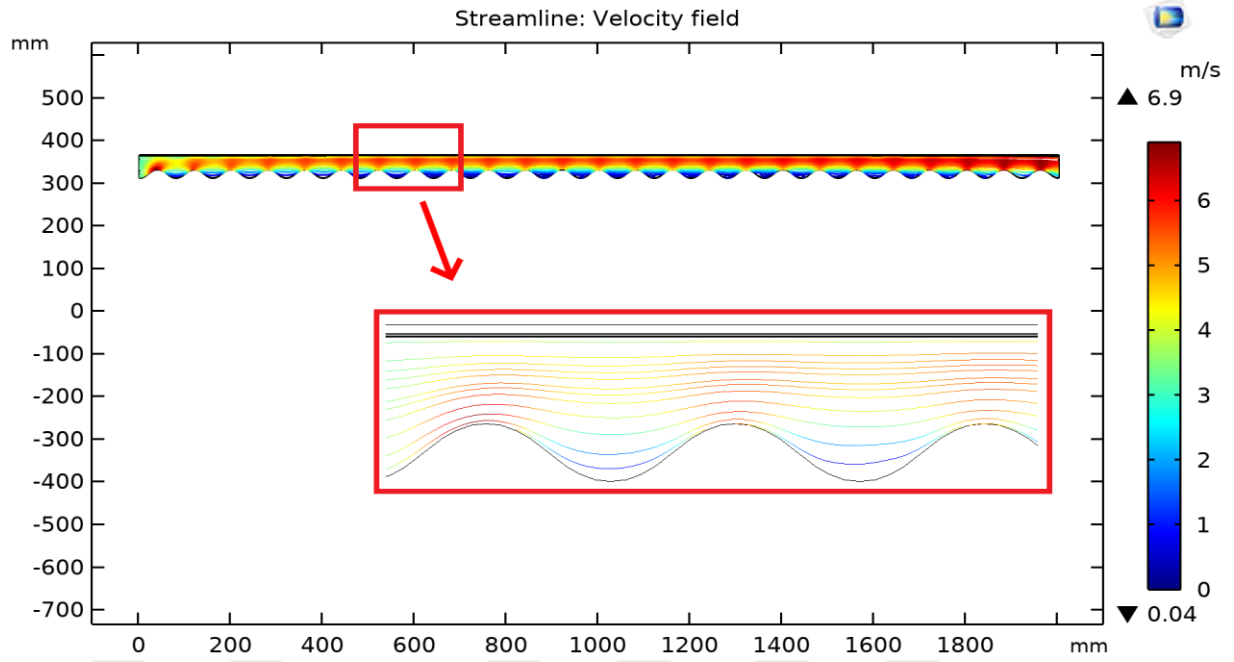


a)

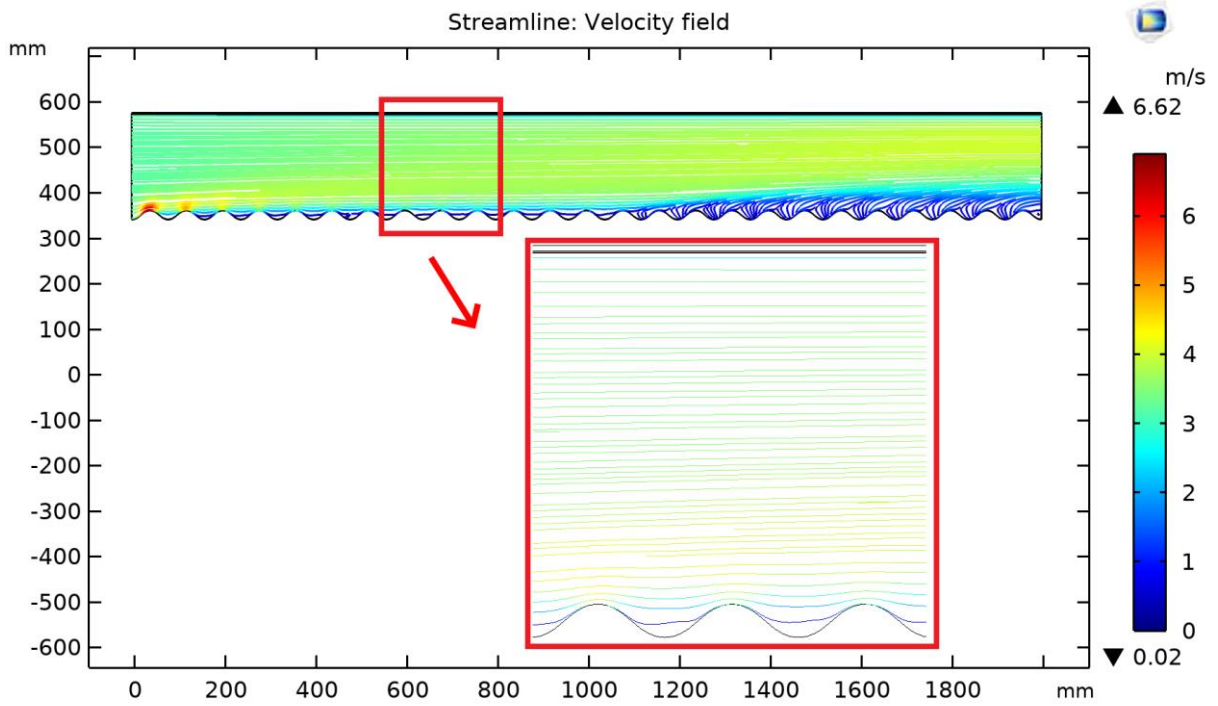


b)

Şekil 42. a) 0,05 m ve b) 0,23 m kanal yüksekliklerinde PV panel- çatı sistemine ait sıcaklık dağılımı.



a)



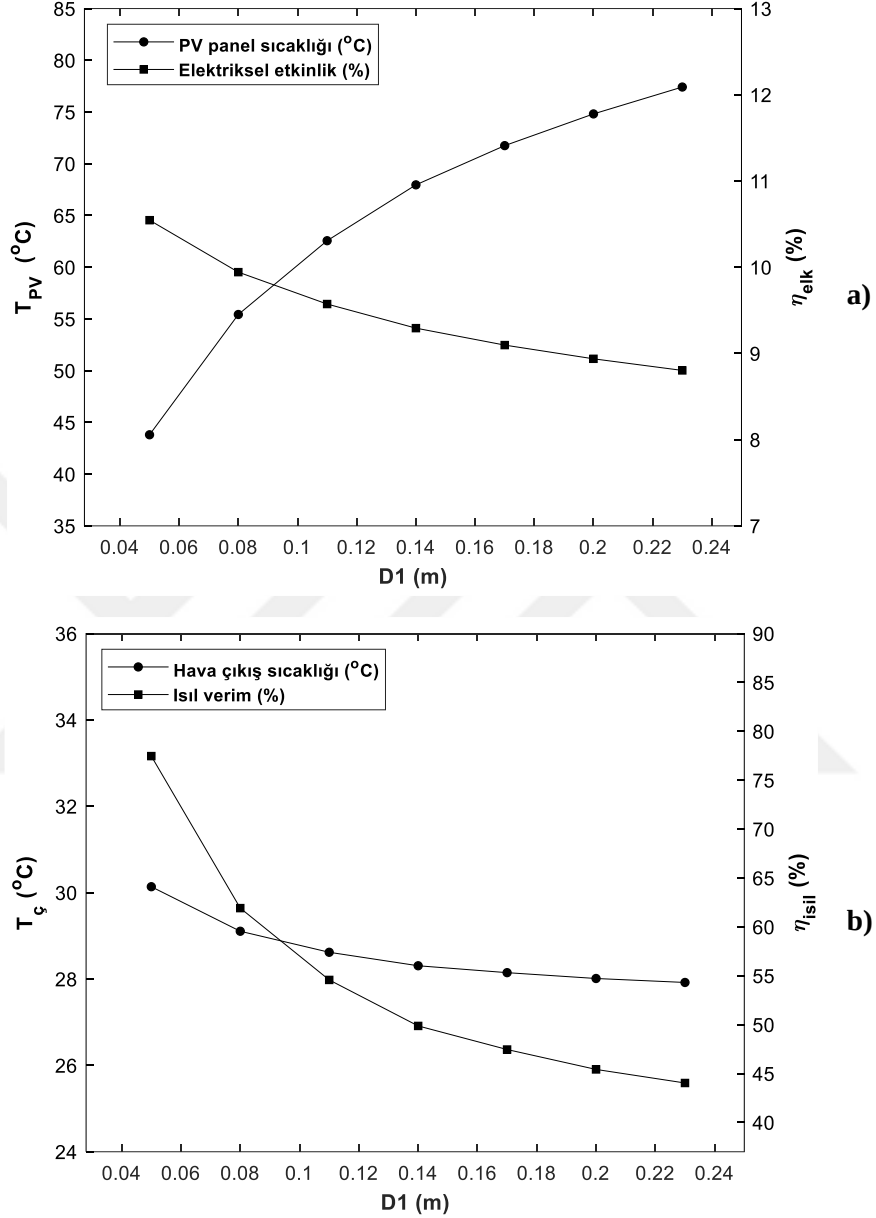
b)

Şekil 43. a) 0,05 m ve b) 0,23 m kanal yüksekliklerinde akım çizgileri.

PV Panel-Çatı Arasındaki Mesafenin PV Panel Performansına Etkisi (Sabit akışkan debisi)

PV panel-çatı arasındaki mesafenin PV panel soğuma performansına olan etkisi önemli bir parametredir. Bu parametre incelenirken önceki bölümde hava akış hızı sabit tutulmuştur. Bu aşamada ise PV panel-çatı arasındaki mesafenin PV panel soğuma performansına olan etkisi

incelenirken soğutma havasının kütesel debisi sabit tutulmuştur. Bu bağlamda çalışmanın bu bölümünde 1000 W/m^2 ışıınım şiddeti ve $0,3 \text{ kg/s}$ sabit rüzgar kütesel debisi altında farklı PV panel-çatı arası mesafe değerleri için ($0,05\text{-}0,23 \text{ m}$ aralığında) sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir.



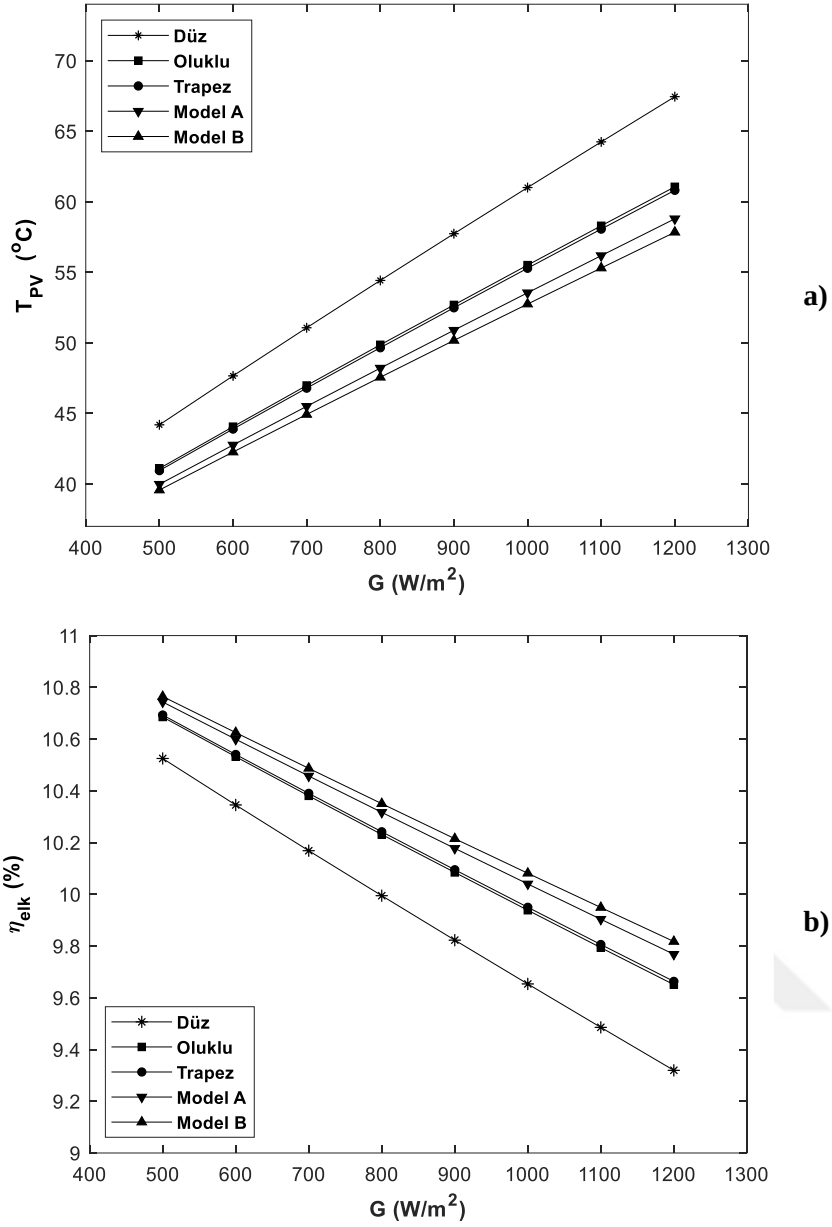
Şekil 44. PV panel-çatı arasındaki mesafenin, sabit akışkan kütesel debisinde a) elektriksel ve b) ısı performansına olan etkisi.

Şekil 44.a’da PV panel-çatı arasındaki mesafenin artmasıyla PV panel yüzey sıcaklığı ve elektriksel verimde meydana gelen değişim gösterilmiştir. Kanal yüksekliği arttıkça PV panel ortalama yüzey sıcaklığı artmakta ve buna bağlı olarak elektriksel verimlilik değeri ise azalmaktadır. Ancak bununla beraber kanal yüksekliği arttıkça PV panel ortalama yüzey sıcaklığının artış oranında bir azalma yaşandığı görülebilmektedir. Belirli bir PV panel-çatı arası mesafeden sonra çatı geometrisinin akış karakteristiğine olan etkisinin azalması bu

durumun temel sebebi olarak gösterilebilir. Bu mesafenin çok daha fazla artması durumunda çatı geometrisi PV panel sıcaklığına hiç etki göstermeyecek ve bu mesafenin etkisi de göz ardı edilebilecektir. PV panel ortalama yüzey sıcaklığının göstermiş olduğu davranışın tam tersi olarak artan mesafe, elektriksel verimde bir düşüşe sebep olmaktadır. Diğer yandan bu düşüş oranında artan mesafe ile birlikte bir azalma yaşanmaktadır. Düşük PV panel-çatı mesafelerinde çatı geometrisinin akış karıştırma ve akış yönlendirme etkisi daha fazla hissedilerek PV panel alt yüzeyinde daha etkin bir soğutma elde edilecektir. Bu sayede PV panel ortalama yüzey sıcaklığı göreceli olarak daha düşük kalacaktır. Sıcaklığın düşmesi ile de elektriksel verimlilik üzerinde olumlu bir etki yaratılacaktır.

Sandviç Çatı Geometrisinin PV Panel Sıcaklığına ve Elektriksel Performansına Etkisi

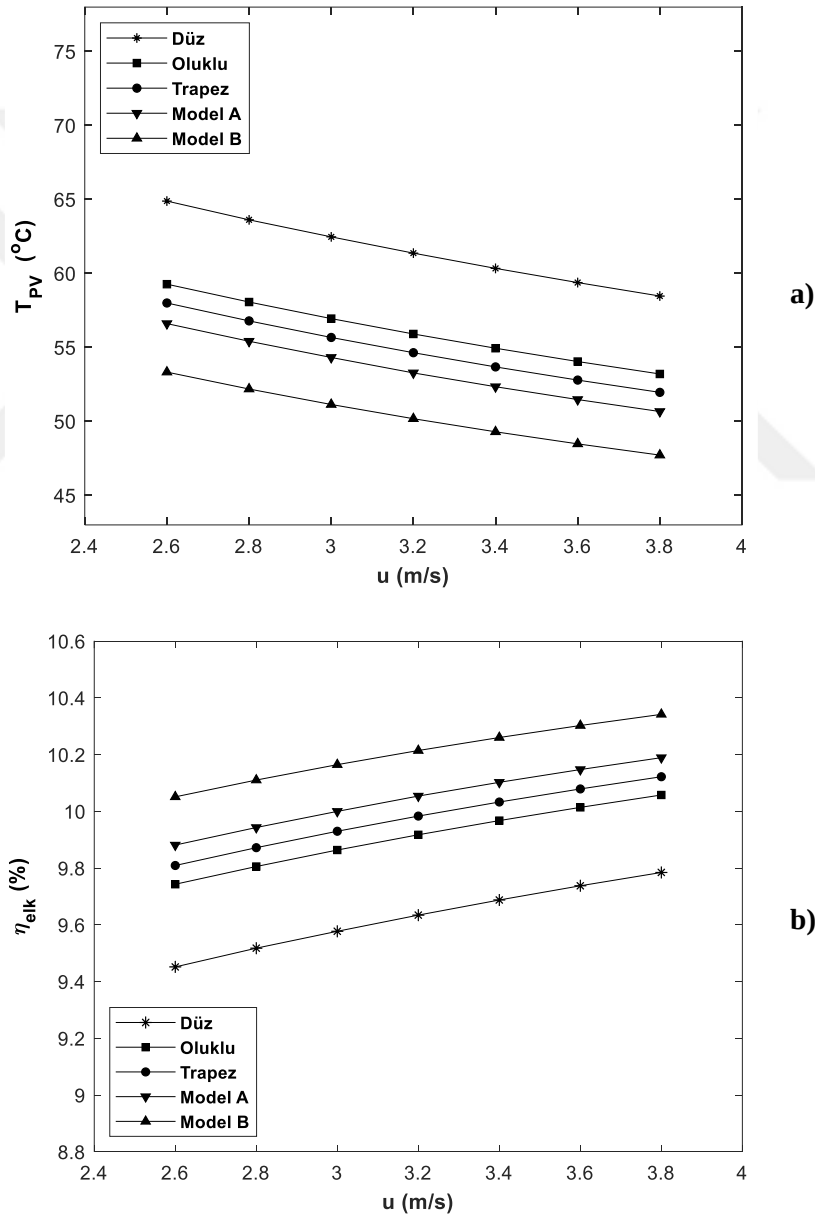
Beş farklı sandviç çatı geometrisinin PV panel sıcaklığına ve elektriksel performansa olan etkisi 500-1200 W/m² sabit ışıınım şiddeti aralığında, 0.08 m kanal yüksekliğinde ve 3,2 m/s sabit rüzgar hızında sayısal olarak incelenmiştir. Şekil 45.a'da farklı sandviç çatı geometrileri için değişen ışıınım şiddeti değerlerinde PV panel yüzey sıcaklığındaki ve elde edilen elektriksel verimdeki değişim gösterilmektedir. Aynı ışıınım şiddeti değerlerinde en yüksek PV panel yüzey sıcaklığı düz sandviç çatı geometrisinde görülmüş ve onu sırasıyla oluklu, trapez, Model A ve Model B çatı geometrileri takip etmiştir. Buna paralel olarak elektriksel verim için de en yüksek değer Model B için elde edilmiş ve bunu sırasıyla Model A, trapez, oluklu ve düz sandviç çatı geometrileri takip etmiştir. PV panel ortalama yüzey sıcaklığı bakımından en yüksek değere sahip düz çatı geometrisine kıyasla aynı rüzgar hızında 500-1200 W/m² sabit ışıınım şiddeti aralığında ortalama PV panel yüzey sıcaklığı Model A için 4,21-8,65 °C ve model B için ise 4,61-9,6 °C aralığında düşüş göstermiştir. Buna paralel olarak düz çatı geometrisine kıyasla aynı rüzgar hızında 500-1200 W/m² sabit ışıınım şiddeti aralığında PV panel elektriksel verim değeri Model A için %0,21-%0,44 ve Model B için %0,23-%0,49 aralığında yükselmiştir. Benzer şekilde bu değerler deneysel analizlerde kullanılan ve baz değer olarak seçilen oluklu çatı geometrisine göre kıyaslandığında ortalama PV panel yüzey sıcaklığının Model A için 1,11-2,26 °C ve Model B için ise 1,52-3,21 °C aralığında düştüğü ve PV panel elektriksel verim değerinin ise Model A için %0,05-%0,11 ve Model B için %0,07-%0,16 aralığında yükseldiği görülmüştür. Farklı sandviç çatı geometrilerinde bu etkinin yaşanmasının temel sebebi sandviç çatıların geometrik yapıları neticesinde PV panel alt yüzeyine soğutucu havayı çarptırarak ve akış karıştırma etkisi yaratarak taşınım ile ısı transferi katsayısını arttırması ve daha etkin bir soğutma sağlamasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 45. Farklı güneş ışınım şiddeti değerleri altında sandviç çatı geometrisinin PV panelin a) sıcaklığına b) elektriksel performansına etkisi.

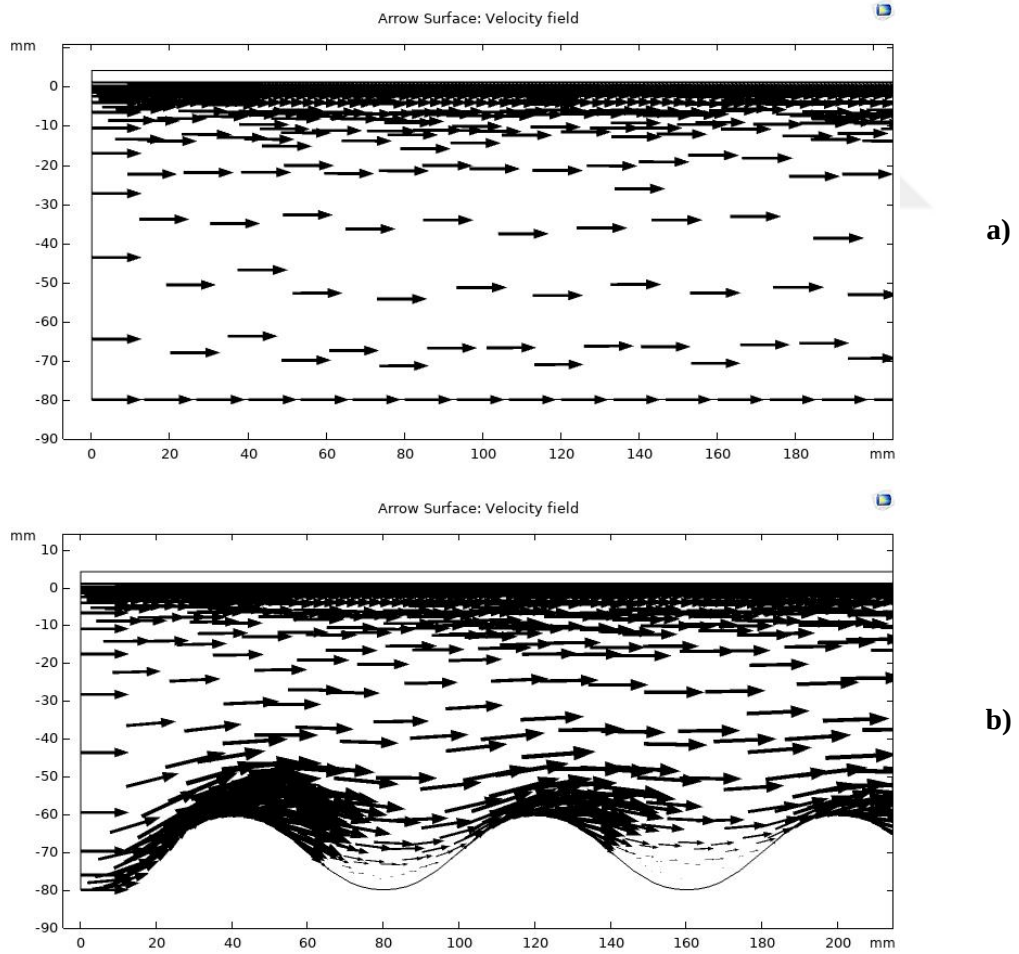
Çalışmaya konu olan sandviç çatı geometrilerinin PV panel sıcaklığına ve elektriksel performansa olan etkisi 0,08 m kanal yüksekliği ve 1000 W/m^2 sabit ışınım şiddetinde 2,6-3,8 m/s aralığında değişen rüzgar hızları için ayrıca teorik olarak incelenmiştir. Şekil 46.a'da farklı sandviç çatı geometrileri için değişen rüzgar hızı değerlerinde PV panel ortalama yüzey sıcaklığındaki ve elektriksel verimdeki değişim gösterilmektedir. Belirli bir rüzgar hızı değerinde, en yüksek PV panel yüzey sıcaklığı düz sandviç çatı geometrisinde gözlemlenmiş olup, bu değeri sırasıyla oluklu, trapez, Model A ve Model B çatı geometrileri takip etmiştir. Benzer şekilde, elektriksel verim açısından en yüksek değer Model B çatı geometrisinde elde edilmiş ve bunu sırasıyla Model A, trapez, oluklu ve düz sandviç çatı geometrileri izlemiştir. PV panel ortalama yüzey sıcaklığı bakımından en yüksek değere sahip düz çatı geometrisine

kıyasla aynı ışınlım şiddetinde 2,6-3,8 m/s rüzgar hızı aralığında ortalama PV panel yüzey sıcaklığı Model A için 8,28-7,8 °C ve Model B için ise 11,56-10,75 °C aralığında düşüş göstermiştir. Buna paralel olarak düz çatı geometrisine kıyasla aynı ışınlım şiddetinde 2,6-3,8 m/s rüzgar hızı aralığında PV panel elektriksel verim değeri Model A için %0,42-%0,40 ve Model B için %0,59-%0,55 aralığında yükselmiştir. Benzer şekilde bu değerler deneysel analizlerde kullanılan ve baz değer olarak seçilen oluklu çatı geometrisine göre kıyaslandığında ortalama PV panel yüzey sıcaklığının Model A için 2,66-2,53 °C ve Model B için ise 5,94-5,48 °C aralığında düştüğü ve PV panel elektriksel verim değerinin ise Model A için %0,138-%0,131 ve Model B için %0,30-%0,28 aralığında yükseldiği görülmüştür.

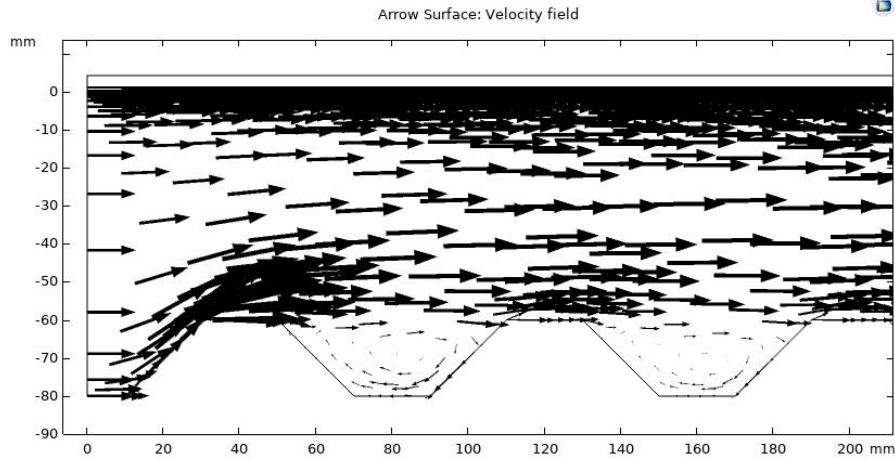


Şekil 46. Farklı rüzgar hızlarında sandviç çatı geometrisinin PV panelin a) sıcaklığına b) elektriksel performansına etkisi.

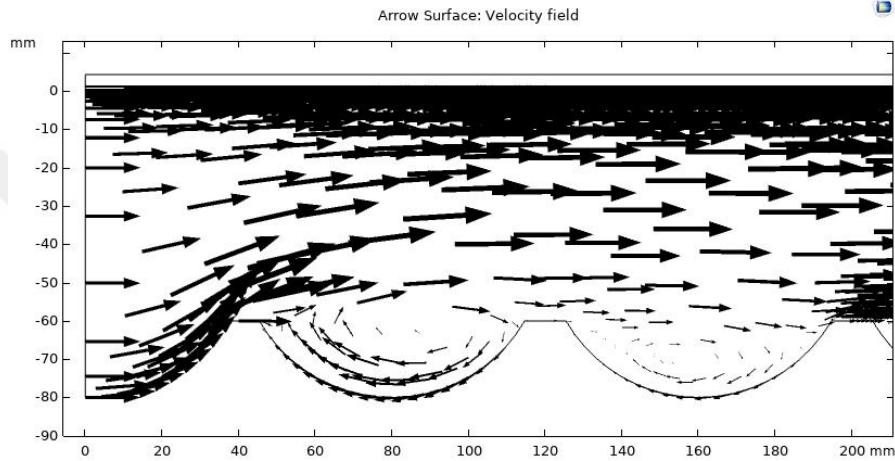
Bahse konu çalışma için Şekil 47’de aynı hava giriş hızlarında sırasıyla düz, oluklu, trapez, Model A ve Model B sandviç çatı geometrilerinin kanal girişindeki vektörel akış çizgileri gösterilmiştir. Burada tasarlanan Model A ve Model B çatı geometrilerinin bir önceki bölümde bahsedilen akış yönlendirme kabiliyetinden dolayı panele çarpan hava akışının etkisi, incelenen diğer sandviç çatı geometrilerine göre daha belirgin hissedilmektedir. Geliştirilen bu geometriler akışın yönlendirilmesini ve dalgalanmasını sağlayarak PV panel yüzeyine çarpan havanın daha etkin bir soğutma performansı göstermesini sağlamaktadır. Akış halindeki havanın sürekli olarak yukarı ve aşağı hareketinden yararlanılarak havanın üst yüzeydeki PV panele çarpması sonucu sistemdeki ısı transferi performansı arttırılmıştır. Bununla beraber düz sandviç çatıya kıyasla diğer çatı geometrilerinde kanalın alt yüzeyinde akış hız profilleri bozulacak şekilde akışın sürekli olarak dalgalanması, ısı transferi performansını arttırıcı bir etki göstermiş (Shen et al., 2021) ve PV panel ortalama yüzey sıcaklığını düşürmüştür. Bu duruma paralel olarak PV panel elektriksel verim değeri de yükselmiştir.



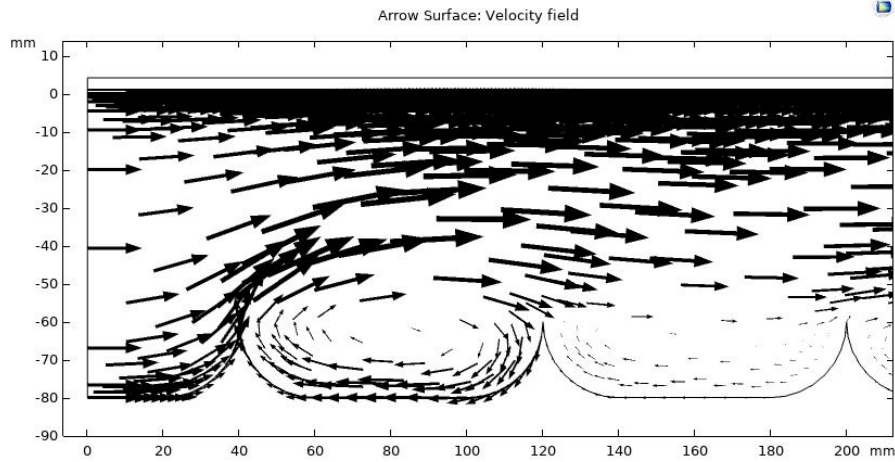
Şekil 47. a) Düz, b) oluklu, c) trapez, d) Model A ve e) Model B sandviç çatı geometrilerine ait kanal girişindeki vektörel akış çizgileri



c)



d)



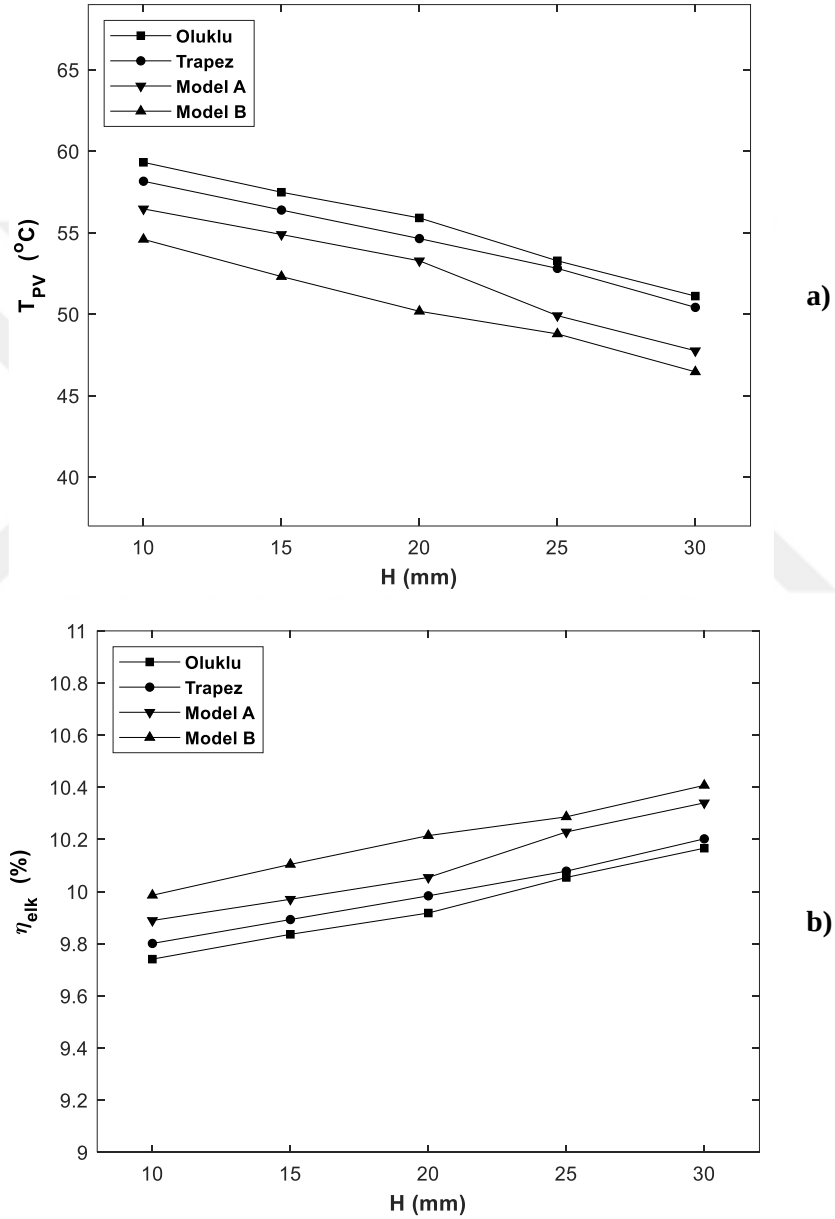
e)

Şekil 47. a) Düz, b) oluklu, c) trapez, d) Model A ve e) Model B sandviç çatı geometrilerine ait kanal girişindeki vektörel akış çizgileri (Devamı)

Çatı Hatve Yüksekliğinin (H) ve Hatve Mesafesinin (W) PV Panel Sıcaklığına ve Elektriksel Performansına Etkisi

PV panel yüzeyine etki eden güneş ışıınım şiddetinin, rüzgar hızının ve PV panel-çatı arasındaki mesafenin üzerine monte edildiği sandviç çatı geometrisi ile beraber PV panelin soğuma performansına olan etkisi önceki bölümlerde incelenmiştir. Sonrasında yapılan sayısal çalışmada ise geliştirilen farklı tiplerdeki sandviç çatı geometrileri için sıcaklık ve elektriksel

verim analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde ise geliştirilen farklı sandviç çatı geometrilerinin hatve yükseklikleri (H) ve hatve mesafeleri (W) değiştirilerek bir takım parametrik analizler yürütülmüştür. Bu kapsamda yürütülen analizler boyunca etkisi incelenen değişken dışındaki diğer tüm parametrik değerler Tablo 9’da belirtilen baz değerlerde sabit tutulmuştur. Şekil 48.a ve b’de sırasıyla sandviç çatı geometrilerinin hatve yüksekliğinin değiştirilmesinden kaynaklı PV panel ortalama yüzey sıcaklığı ve elektriksel verimde meydana gelen değişim gösterilmektedir.

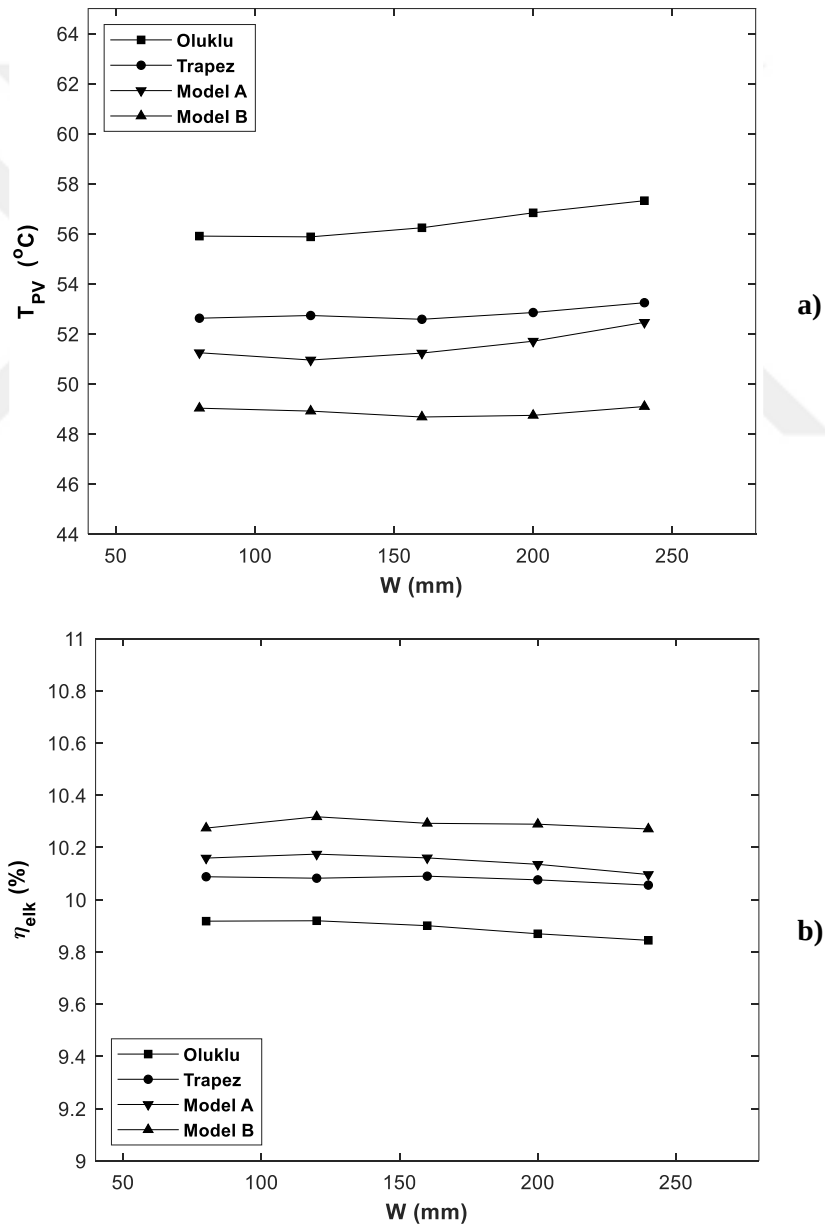


Şekil 48. Çatı hatve yüksekliğinin (H) a) PV panel sıcaklığına ve b) elektriksel performansına etkisi.

Çalışılan aralıkta hatve yüksekliği arttıkça oluklu, trapez, Model A ve Model B sandviç çatı geometrik yapıları için PV panel ortalama yüzey sıcaklıkları sırasıyla 8,21, 7,74, 8,7 ve 8,13 °C azalmıştır. Buna bağlı olarak elektriksel verim değerlerinde ise sırasıyla %0,42, %0,40,

%0,45 ve %0,42 değerinde bir artış yaşanmıştır. Çatı geometrik yapılarına bakıldığında H yüksekliğinin artmasıyla akış kanalında ani daralmaların meydana geldiği görülmektedir. Bu daralan kesitlerde akış hızı yükselmekte ve buna bağlı olarak Reynolds sayısı artmaktadır. Reynolds sayısındaki bu artış taşınım ile ısı transferi katsayısını arttırmakta ve bu da hava akışının soğutma etkinliğini arttırmaktadır. Bu durum H yüksekliğinin artmasıyla beraber PV panel ortalama yüzey sıcaklığının azalmasına ve elektriksel verim değerinin de artmasına sebep olmaktadır.

Şekil 49.a ve b’de ise sırasıyla sandviç çatı geometrilerinin hatve mesafelerinin değiştirilmesinden kaynaklı PV panel ortalama yüzey sıcaklığı ve elektriksel verimde meydana gelen değişim gösterilmektedir.



Şekil 49. Çatı hatve mesafesinin (W) a) PV panel sıcaklığına ve b) elektriksel performansına etkisi.

PV panel yüzey sıcaklığına ve dolayısıyla elektriksel verim değerine hatve mesafelerinin hatve yüksekliği kadar etki ettiği söylenemez. Ancak bununla beraber çalışılan aralıkta hatve mesafeleri arttıkça incelenen sandviç çatı geometrik yapıları için PV panel ortalama yüzey sıcaklıkları belirli düzeyde artmaktadır. Buna bağlı olarak elektriksel verim değerlerinde ise hatve mesafesi arttıkça belirli oranda bir azalma meydana gelmektedir. Hatve mesafesinin 80 mm'den 240 mm'ye çıkarılmasıyla PV panel ortalama yüzey sıcaklığı oluklu, trapez, Model A ve Model B sandviç çatı geometrik yapıları için sırasıyla 1,41, 0,61, 1,22 ve 0,067 °C artarken elektriksel verim ise sırasıyla %0,073, %0,032, %0,063 ve %0,004 değerinde azalmıştır. Burada hatve mesafesinin artmasıyla oluklu, trapez, Model A ve Model B gibi geometrik yapıların hava akışını bozma etkisinin azaldığı söylenebilir. Diğer bir deyişle büyük hatve mesafelerinde hava akışının bozulması zayıflamış ve taşınım ile ısı transferi katsayısı azalmıştır. Sonuç olarak soğutma havasına daha az ısı aktarılmış ve bu da daha yüksek bir PV panel yüzey sıcaklığına ve daha düşük elektriksel verimliliğe yol açmıştır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Güneş enerjisine dayalı elektrik üreten PV panellerin elektriksel performansı, farklı tasarım ve çalışma parametrelerine bağlı olarak değişim göstermektedir. PV panel sistemlerinin performansı, panellerin etkin bir şekilde soğutulması ile önemli düzeyde iyileşmektedir. Bu doğrultuda bu tez çalışması kapsamında PV panellerin montajının yapıldığı sandviç çatı geometrik yapısının ve aynı zamanda çatı-PV panel arasındaki mesafelerin farklı güneş ışınım şiddeti ve rüzgar hızlarında PV panel sıcaklığına ve dolayısıyla elektriksel verime olan etkileri deneysel ve geliştirilen sayısal model vasıtasıyla teorik olarak incelenmiştir.

Çalışma kapsamında, öncelikle PV panel sıcaklığının elektriksel verimliliğe olan etkisi deneysel olarak çalışılmış ve sonrasında ise COMSOL Multiphysics yazılım programıyla deneysel verilerle doğrulanan bir matematiksel model geliştirilerek parametrik çalışmalar yürütülmüştür. Elde edilen bulgular ana hatlarıyla aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Laboratuvar ortamında yapılan deneylerden PV panel ortalama yüzey sıcaklığının her 1 °C artışıyla elektriksel güç çıkışında ortalama 0,82 W'lık bir düşüşün meydana geldiği gözlemlenmiştir.
- Oluklu sandviç çatı üzerine 0,08 m yükseklik seviyesinde monte edilen bir PV panel için rüzgar hızındaki her 0,2 m/s'lik artış, ortalama olarak 0,92 °C'lik bir sıcaklık düşümüne ve buna bağlı olarak %0,4 elektriksel verim artışına sebep olmaktadır.
- Yürütülen sayısal analizler neticesinde PV panel yüzey sıcaklığının ışıınım şiddetiyle doğru orantılı olarak artarak her 100 W/m² ışıınım şiddeti için 2,84 °C yükseldiği, elektriksel verimin ise %0,14 seviyesinde azaldığı görülmüştür.
- Akış halindeki havanın, akışı bozan çatı geometrisi sayesinde sürekli olarak yukarı ve aşağı hareketi, dar kesitteki havanın ısı transferi performansını arttırmıştır. Sabit rüzgar hızında PV panel-çatı arasındaki mesafenin 0,05 m'den 0,23 m'ye yükselmesiyle PV panel ortalama yüzey sıcaklığı artmıştır. Ancak ısı transferinde hissedilen bu durum belirli bir yükseklikten sonra mesafeden bağımsız hale gelerek etkisini kaybetmiştir.
- Benzer şekilde sabit hava kütleli debisi koşullarında kanal yüksekliği arttıkça PV panelin ortalama yüzey sıcaklığının yükseldiği ancak bu artışın kanal yüksekliğinin artmasıyla birlikte belirli bir limit değere yaklaştığı gözlemlenmiştir. Bu durum, belirli bir yükseklikten sonra çatı geometrisinin akış karakteristiği üzerindeki

etkisinin azaldığını ve sandviç çatı geometrik yapısının PV panel performansı üzerindeki etkisinin göz ardı edilebilir seviyeye ulaşacağını göstermektedir.

- Tasarlanan Model A ve Model B çatı geometrilerinin akış yönlendirme kabiliyetinden dolayı PV panel yüzeyine çarpan havanın daha etkin bir soğutma performansı göstermesi ve kanalın alt yüzeyinde akış hız alanı bozulacak şekilde akışın sürekli olarak dalgalanması, ısı transferi performansını arttırıcı bir etki göstermiştir. Bu nedenlerden dolayı Model B'nin diğer geometrilere kıyasla daha iyi bir ısı transferi performansına sahip olduğu ve dolayısıyla PV panel sıcaklığını düşürerek elektriksel verimliliği arttıracığı sonucuna ulaşılmıştır.
- İncelenen tüm sandviç çatı modelleri için hatve yüksekliğinin (H) artması, akış kanalında ani daralmaların meydana gelmesine sebep olarak akış hızını arttırmıştır. Bu durum Reynolds sayını arttırarak ısı transferi performansını yükseltmiştir. Bu sayede PV panel yüzey sıcaklığı azalmış ve panel elektriksel verim değeri artmıştır.
- Hatve yüksekliği kadar PV panel performansı üzerinde belirgin bir etkisi olmasa da hatve mesafesinin (W) artması çatı geometrisinin akış karıştırma performansını düşürücü bir etki göstermiştir. Bu durum, uygulanan akışın çalkantısını azaltarak soğutma etkisini düşürmüş ve PV panel elektriksel veriminin azalmasına sebep olmuştur.

KAYNAKLAR

- Anonim, (2023a). <https://www.kameraarkasi.org/light/digerkaynaklar/gunesisigi.html> (01.03.2024)
- Anonim, (2023b). <https://tr.weatherspark.com/y/102045/Erzurum-T%C3%BCrkiye-Ortalama-Hava-Durumu-Y%C4%B1l-Boyunca#Figures-WindSpeed> (05.03.2024)
- IEA, Share of renewable electricity generation by technology, 2000-2028, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/share-of-renewable-electricity-generation-by-technology-2000-2028>, IEA. Licence: CC BY 4.0 (01.04.2024)
- IEA, World electricity generation mix by fuel, 1971-2019, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-electricity-generation-mix-by-fuel-1971-2019>, IEA. Licence: CC BY 4.0 (01.04.2024)
- Abou Jieb, Y., Hossain, E., & Hossain, E. (2022). Photovoltaic systems: fundamentals and applications. Springer.
- Adaramola, M. S., & Vågnes, E. E. T. (2015). Preliminary assessment of a small-scale rooftop PV-grid tied in Norwegian climatic conditions. *Energy Conversion and Management*, 90, 458–465.
- Adeeb, J., Farhan, A., & Al-Salaymeh, A. (2019). Temperature effect on performance of different solar cell technologies. *Journal of Ecological Engineering*, 20(5), 249–254.
- Ahmadi, M. H., Baghban, A., Sadeghzadeh, M., Hadipoor, M., & Ghazvini, M. (2020a). Evolving connectionist approaches to compute thermal conductivity of TiO₂/water nanofluid. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 540.
- Ahmadi, M. H., Baghban, A., Sadeghzadeh, M., Hadipoor, M., & Ghazvini, M. (2020b). Evolving connectionist approaches to compute thermal conductivity of TiO₂/water nanofluid. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 540, 122489.
- Ali, H. M., Zafar, M. A., Bashir, M. A., Nasir, M. A., Ali, M., & Siddiqui, A. M. (2017a). Effect of dust deposition on the performance of photovoltaic modules in city of taxila, Pakistan. *Thermal Science*, 21(2), 915–923.
- Ali, H. M., Zafar, M. A., Bashir, M. A., Nasir, M. A., Ali, M., & Siddiqui, A. M. (2017b). Effect of dust deposition on the performance of photovoltaic modules in city of taxila, Pakistan. *Thermal Science*, 21(2), 915–923.
- Allouhi, A., Saadani, R., Kousksou, T., Saidur, R., Jamil, A., & Rahmoune, M. (2016). Grid-connected PV systems installed on institutional buildings: Technology comparison, energy analysis and economic performance. *Energy and Buildings*, 130, 188–201.
- Al-Otaibi, A., Al-Qattan, A., Fairouz, F., & Al-Mulla, A. (2015). Performance evaluation of photovoltaic systems on Kuwaiti schools' rooftop. *Energy Conversion and Management*, 95, 110–119.
- Arenandan, V., Wong, J. K., Ahmed, A. N., & Chow, M. F. (2022). Efficiency enhancement in energy production of photovoltaic modules through green roof installation under tropical climates. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(5), 101741.
- Baghdadi, I., Yaakoubi, A. El, Attari, K., Leemrani, Z., & Asselman, A. (2018). Performance investigation of a PV system connected to the grid. *Procedia Manufacturing*, 22, 667–674.

- Bayod-Rújula, A. A. (2019). Solar photovoltaics (PV). In *Solar Hydrogen Production: Processes, Systems and Technologies* (pp. 237–295). Elsevier.
- Bayrak, F., Oztop, H. F., & Selimefendigil, F. (2019). Effects of different fin parameters on temperature and efficiency for cooling of photovoltaic panels under natural convection. *Solar Energy*, 188, 484–494.
- Bilen, K., & Erdoğan, İ. (2023). Effects of cooling on performance of photovoltaic/thermal (PV/T) solar panels: A comprehensive review. In *Solar Energy* (Vol. 262). Elsevier Ltd.
- Das, D., Kalita, P., Dewan, A., & Tanweer, S. (2019). Development of a novel thermal model for a PV/T collector and its experimental analysis. *Solar Energy*, 188, 631–643.
- Demir, C. Y., 2024. Binaya Entegreli Fotovoltaik Uygulamaların Tasarımına Etki Eden Parametrelerin Deneysel Analizi. Doktora Tezi, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, Türkiye.
- Duffie, J. A., and Beckman, W. A., 1980. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Second Edition. 919, A Wiley-Interscience Publication.
- Fayaz, H., Rahim, N. A., Hasanuzzaman, M., Rivai, A., & Nasrin, R. (2019). Numerical and outdoor real time experimental investigation of performance of PCM based PVT system. *Solar Energy*, 179, 135–150.
- Ghadiri, M., Sardarabadi, M., Pasandideh-Fard, M., & Moghadam, A. J. (2015). Experimental investigation of a PVT system performance using nano ferrofluids. *Energy Conversion and Management*, 103, 468–476.
- Ghenai, C., Ahmad, F. F., Rejeb, O., & Bettayeb, M. (2022). Artificial neural networks for power output forecasting from bifacial solar PV system with enhanced building roof surface Albedo. *Journal of Building Engineering*, 56, 104799.
- Hasan, A., Sarwar, J., Alnoman, H., & Abdelbaqi, S. (2017). Yearly energy performance of a photovoltaic-phase change material (PV-PCM) system in hot climate. *Solar Energy*, 146, 417–429.
- Jasim Hasan, D., Farhan, A. A., & Author, C. (2019). *Enhancing the Efficiency of Photovoltaic Panel Using Open-Cell Copper Metal Foam Fins* (Vol. 9, Issue 4).
- Jayasinghe, M. T. R., Attalage, R. A., & Jayawardena, A. I. (2003). Roof orientation, roofing materials and roof surface colour: their influence on indoor thermal comfort in warm humid climates. *Energy for Sustainable Development*, 7(1), 16–27.
- Katsumata, N., Nakada, Y., Minemoto, T., & Takakura, H. (2011a). Estimation of irradiance and outdoor performance of photovoltaic modules by meteorological data. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(1), 199–202.
- Katsumata, N., Nakada, Y., Minemoto, T., & Takakura, H. (2011b). Estimation of irradiance and outdoor performance of photovoltaic modules by meteorological data. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(1), 199–202.
- Lee, S., Park, S. H., Yeo, M. S., & Kim, K. W. (2009). An experimental study on airflow in the cavity of a ventilated roof. *Building and Environment*, 44(7), 1431–1439.
- Maleki, A., Haghighi, A., El Haj Assad, M., Mahariq, I., & Alhuyi Nazari, M. (2020). A review on the approaches employed for cooling PV cells. In *Solar Energy* (Vol. 209, pp. 170–185). Elsevier Ltd.
- Mamun, M. A. A., Islam, M. M., Hasanuzzaman, M., & Selvaraj, J. (2022). Effect of tilt angle on the performance and electrical parameters of a PV module: Comparative indoor and outdoor experimental investigation. *Energy and Built Environment*, 3(3), 278–290.

- Mazón-Hernández, R., García-Cascales, J. R., Vera-García, F., Káiser, A. S., & Zamora, B. (2013). Improving the electrical parameters of a photovoltaic panel by means of an induced or forced air stream. *International Journal of Photoenergy*, 2013.
- Mickey, C. D. (n.d.). *Solar Photovoltaic Cells*.
- Muehleisen, W., Loeschnig, J., Feichtner, M., Burgers, A. R., Bende, E. E., Zamini, S., Yerasimou, Y., Kosel, J., Hirschl, C., & Georghiou, G. E. (2021). Energy yield measurement of an elevated PV system on a white flat roof and a performance comparison of monofacial and bifacial modules. *Renewable Energy*, 170, 613–619.
- Nahar, A., Hasanuzzaman, M., & Rahim, N. A. (2017). Numerical and experimental investigation on the performance of a photovoltaic thermal collector with parallel plate flow channel under different operating conditions in Malaysia. *Solar Energy*, 144, 517–528.
- Ozgoren, M., Aksoy, M. H., Bakir, C., & Dogan, S. (n.d.). *Experimental Performance Investigation of Photovoltaic/Thermal (PV-T) System*.
- Parida, B., Iniyan, S., & Goic, R. (2011a). A review of solar photovoltaic technologies. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 15, Issue 3, pp. 1625–1636).
- Parida, B., Iniyan, S., & Goic, R. (2011b). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1625–1636.
- Pathak, S. K., Sharma, P. O., Goel, V., Bhattacharyya, S., Aybar, H., & Meyer, J. P. (2022). A detailed review on the performance of photovoltaic/thermal system using various cooling methods. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 51.
- Raina, G., Vijay, R., & Sinha, S. (2022). Assessing the suitability of I-V curve translation at varying irradiance and temperature range. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 51.
- Rawat, P., Mehrotra, S., Debbarma, M., & Sudhakar, K. (2014). *Performance of A Solar Panel With Water Immersion Cooling Technique*. www.ijset.net
- Rehman, S., & El-Amin, I. (2012). Performance evaluation of an off-grid photovoltaic system in Saudi Arabia. *Energy*, 46(1), 451–458.
- Renné, D. S. (2016). Resource assessment and site selection for solar heating and cooling systems. In *Advances in Solar Heating and Cooling* (pp. 13–39). Elsevier Inc.
- Sargunanathan, S., Elango, A., & Mohideen, S. T. (2016a). Performance enhancement of solar photovoltaic cells using effective cooling methods: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 64, pp. 382–393). Elsevier Ltd.
- Sargunanathan, S., Elango, A., & Mohideen, S. T. (2016b). Performance enhancement of solar photovoltaic cells using effective cooling methods: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 382–393.
- Shaari, S., Sopian, K., Amin, N., & Kassim, M. N. (2009a). The Temperature Dependence Coefficients of Amorphous Silicon and Crystalline Photovoltaic Modules Using Malaysian Field Test Investigation. *American Journal of Applied Sciences*, 6(4), 586–593.
- Shaari, S., Sopian, K., Amin, N., & Kassim, M. N. (2009b). The Temperature Dependence Coefficients of Amorphous Silicon and Crystalline Photovoltaic Modules Using Malaysian Field Test Investigation. *American Journal of Applied Sciences*, 6(4), 586–593.

- Sharaf, M., Yousef, M. S., & Huzayyin, A. S. (2022a). Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systems. In *Environmental Science and Pollution Research* (Vol. 29, Issue 18, pp. 26131–26159). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.
- Sharaf, M., Yousef, M. S., & Huzayyin, A. S. (2022b). Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systems. In *Environmental Science and Pollution Research* (Vol. 29, Issue 18, pp. 26131–26159). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.
- Sharma, A. (2011a). A comprehensive study of solar power in India and World. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 15, Issue 4, pp. 1767–1776). Elsevier Ltd.
- Sharma, A. (2011b). A comprehensive study of solar power in India and World. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 15, Issue 4, pp. 1767–1776). Elsevier Ltd.
- Shen, C., Zhang, Y., Zhang, C., Pu, J., Wei, S., & Dong, Y. (2021). A numerical investigation on optimization of PV/T systems with the field synergy theory. *Applied Thermal Engineering*, 185.
- Sherwani, A. F., Usmani, J. A., & Varun. (2010a). Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 14, Issue 1, pp. 540–544).
- Sherwani, A. F., Usmani, J. A., & Varun. (2010b). Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 14, Issue 1, pp. 540–544).
- Shukla, A., Kant, K., Sharma, A., & Biwole, P. H. (2017a). Cooling methodologies of photovoltaic module for enhancing electrical efficiency: A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 160, 275–286.
- Shukla, A., Kant, K., Sharma, A., & Biwole, P. H. (2017b). Cooling methodologies of photovoltaic module for enhancing electrical efficiency: A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 160, 275–286.
- Siddiqui, R., Kumar, R., Jha, G. K., Gowri, G., Morampudi, M., Rajput, P., Lata, S., Agariya, S., Dubey, B., Nanda, G., & Raghava, S. S. (2016). Comparison of different technologies for solar PV (Photovoltaic) outdoor performance using indoor accelerated aging tests for long term reliability. *Energy*, 107, 550–561.
- Solanki, S. C., Dubey, S., & Tiwari, A. (2009). Indoor simulation and testing of photovoltaic thermal (PV/T) air collectors. *Applied Energy*, 86(11), 2421–2428.
- Sopian, K., Liu, H. T., Kakac, S., & Veziroglu, T. N. (n.d.-a). *Performance of a double pass photovoltaic thermal solar collector suitable for solar drying systems*. www.elsevier.com/locate/enconman
- Sopian, K., Liu, H. T., Kakac, S., & Veziroglu, T. N. (n.d.-b). *Performance of a double pass photovoltaic thermal solar collector suitable for solar drying systems*. www.elsevier.com/locate/enconman
- Sultan, S. M., Tso, C. P., & Efzan, M. N. E. (2020). A new approach for photovoltaic module cooling technique evaluation and comparison using the temperature dependent photovoltaic power ratio. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 39.
- Teo, H. G., Lee, P. S., & Hawlader, M. N. A. (2012). An active cooling system for photovoltaic modules. *Applied Energy*, 90(1), 309–315.

- Tiwari, G. N., Tiwari, A., & Shyam. (2016a). Solar Cell Materials, Photovoltaic Modules and Arrays. In *Energy Systems in Electrical Engineering: Vol. Part F2123* (pp. 123–170). Springer.
- Tiwari, G. N., Tiwari, A., & Shyam. (2016b). *Solar Cell Materials, Photovoltaic Modules and Arrays* (pp. 123–170).
- Tzeng, S. C., & Jeng, T. M. (2006). Convective heat transfer in porous channels with 90-deg turned flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(7–8), 1452–1461.
- Zhang, Y., Shen, C., Zhang, C., Pu, J., Yang, Q., & Sun, C. (2022). A novel porous channel to optimize the cooling performance of PV modules. *Energy and Built Environment*, 3(2), 210–225.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Beytullah İsmet TOPRAK
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Ayrancı Anadolu Lisesi
Lisans:	Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Anabilim Dalı (2020)
Doktora:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı (2025)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
	-
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
	-