
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

YENİ NESİL GÜNEŞ ENERJİLİ BİR KURUTUCUNUN TASARIMI, İMALATI VE PERFORMANS ANALİZİ

Fazlı BAYRAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Fazlı BAYRAK
09/01/2025

YENİ NESİL GÜNEŞ ENERJİLİ BİR KURUTUCUNUN TASARIMI, İMALATI VE PERFORMANS ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Fazlı BAYRAK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2025

ÖZET

Bu çalışma, sıcaklık kontrol algoritması kullanan yeni bir fotovoltaik termal (PVT) kolektör kullanarak elektrik ve kurutma verimliliğini artırmayı amaçlamıştır. Elma dilimleri değişken hava debili PVT kurutucuda ve sabit hava debili PVT kurutucuda farklı hava hızlarında kurutularak iki sistem aynı dış ortam şartlarında test edilmiştir. Yeni tasarımı ile homojen soğutma sağlayan ve oluşturulan algoritma ile PV'nin yüzey sıcaklığına göre hava debisini kontrol eden değişken hava debili PVT kurutucu sisteminin performansı sabit hava debili PVT kurutucu ile karşılaştırılmıştır. Yüksek hava debisine sahip sabit hava debili PVT kurutucuda, PVT'nin ortalama yüzey sıcaklığı günlük olarak sırasıyla %5,76 ve %5,63 daha düşükken, değişken hava debili PVT kurutucudaki değerler sabit hava debili PVT kurutucuya kıyasla %7,15 ve %4,26 daha düşük olarak görülmüştür. Maksimum elektrik verimliliği 1, 3 ve 4. günlerde sırasıyla %12,51, %11,96 ve %12,57 olarak hesaplanmıştır. PVT için ortalama termal verimlilikler açısından, 3. günün en yüksek değeri sabit hava debili PVT kurutucuda %39,05 iken, 3. günün en düşük değeri değişken hava debili PVT kurutucuda %28,67 olarak hesaplanmıştır. Değişken hava debisi kontrolü PVT'de elektrik verimliliğini önemli ölçüde artırmasına rağmen, termal verimlilik sabit hava debili PVT kurutucuya kıyasla daha düşük performans sergilemiştir. Ürünlerin kurutulması için sürdürülebilir bir kurutucu modeli bu tez çalışması ile ortaya konmuştur.

Bilim Kodu : 92802
Anahtar Kelimeler : PV, PVT, PVT kurutucu, kontrol algoritması, değişken hava debisi, elma kurutma.
Sayfa Adedi : 67
Danışman : Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ

DESIGN, FABRICATION AND PERFORMANCE ANALYSIS OF A NEW GENERATION SOLAR DRYER

(M. Sc. Thesis)

Fazlı BAYRAK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2025

ABSTRACT

This study aims to enhance electrical and drying efficiency using a novel photovoltaic thermal (PVT) collector that employs a temperature control algorithm. Apple slices were dried at different air velocities in both a variable air flow PVT dryer and a constant air flow PVT dryer, and the two systems were tested under identical external environmental conditions. The performance of the variable air flow PVT dryer, which provides uniform cooling with its new design and controls the air flow based on the surface temperature of the PV through the implemented algorithm, was compared to that of the constant air flow PVT dryer. In the constant air flow PVT dryer with high air velocity, the average surface temperature of the PVT was found to be 5.76% and 5.63% lower daily, respectively, while in the variable air flow PVT dryer, the values were 7.15% and 4.26% lower compared to the constant air flow PVT dryer. The maximum electrical efficiency was calculated as 12.51%, 11.96%, and 12.57% on days 1, 3, and 4, respectively. In terms of average thermal efficiencies for the PVT, the highest value on day 3 was 39.05% in the constant air flow PVT dryer, while the lowest value on day 3 was 28.67% in the variable air flow PVT dryer. While the variable air flow control in the PVT significantly increased electrical efficiency, thermal efficiency exhibited lower performance compared to the constant air flow PVT dryer. A sustainable drying model for product drying is presented in this thesis.

Science Code : 92802
Key Words : PV, PVT, PVT dryer, control algorithm, variable air volume, apple drying
Page Number : 67
Supervisor : Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bilgisini ve deneyimlerini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ'a teşekkür ederim. Ayrıca çalışmamda desteğini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Ahmet AKTAŞ'a, deney setinin kurulumunda yardımcı olan Öğr. Gör. Dr. Burak AKTEKELİ'ye, çalışmam esnasında desteğini esirgemeyen sevgili eşim Burcu BAYRAK'a ve ayrıca eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi olarak desteklerini esirgemeyen annem Pamuk BAYRAK ve babam Halil İbrahim BAYRAK'a sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ viii

ŞEKİLLERİN LİSTESİ ix

RESİMLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

2. GENEL BİLGİLER 5

2.1. Güneş Enerjisi 5

2.1.1. Güneş enerjisi sistemleri 6

2.1.2. Güneş enerjisinden ısı enerjisi elde edilmesi 6

2.1.3. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde edilmesi 10

2.2. Fotovoltaik Panel Soğutma Uygulamaları 14

2.2.1. PVT destekli soğutma sistem uygulamaları 14

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 17

4. TEORİK ANALİZ 23

5. MATERYAL VE METOT 29

5.1. Deneysel Sistem Tasarımı ve Analizi 29

5.1.1. PVT tasarımı ve üretimi 29

5.1.2. Kontrol algoritması 33

5.1.3. Elmaların hazırlanması 37

Sayfa

5.1.4. Deneysel prosedür 37

6. DENEY SONUÇLARI 39

6.1. Elektriksel ve Termal Analizler 39

6.2. Kurutma Analizleri 48

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 53

7.1. Sonuçlar 53

7.2. Öneriler 54

KAYNAKLAR 57

EKLER 63

Ek-1. Yeni nesil güneş enerjili bir kurutucunun imalat fotoğrafları 64

Ek-2. PVT panel imalat süreci fotoğrafı 65

Ek-3. Kurutma odası imalat süreci fotoğrafı 66

ÖZGEÇMİŞ 67

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.1. PVT sistemlerinde kullanılan ekipman ve ölçüm cihazlarının özellikleri .. 31

Çizelge 5.2. Sistemdeki ölçüm noktaları..... 34

Çizelge 5.3. Deneysel prosedür..... 38

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Güneş enerjisinin uygulama alanları 6

Şekil 2.2. Sıvı bazlı güneş kollektör türleri..... 8

Şekil 2.3. Sıvı akışkanlı güneş kollektörünün yapısal gösterimi 9

Şekil 2.4. Hava güneş kollektör sisteminin detay gösterimi..... 9

Şekil 2.5. Fotovoltaik hücrelerin elektrik üretim süreci şeması..... 13

Şekil 2.6. Fotovoltaik panellerde kullanılan çeşitli güneş hücresi türleri 13

Şekil 3.1. Mikrokapsüllü faz değişim malzemeli PVT sistem tasarımı..... 20

Şekil 3.2. Nano akışkanlı PVT sistem tasarımı..... 20

Şekil 5.1. VAVPVTD ve CAVPVTD sistemlerinin şematik gösterimi 30

Şekil 5.2. Ölçüm noktalarının gösterimi..... 32

Şekil 5.3. PVT'lerin hava yolu ve kanat yapısının ayrıntılı çizimleri 33

Şekil 5.4. PVT sistemlerindeki kontrol kartı ve veri kaydedici devreleri..... 35

Şekil 5.5. CAVPVT sistemi kontrol algoritmasının akış şeması..... 36

Şekil 6.1. Testler sırasında çevresel parametreleri gösteren değerler..... 40

Şekil 6.2. Çıkış havası sıcaklığındaki anlık değişim..... 41

Şekil 6.3. Hava hızının anlık değişimi..... 42

Şekil 6.4. PVT yüzey sıcaklıklarındaki anlık değişim..... 43

Şekil 6.5. 4. günde çekilen termal kamera görüntüleri 44

Şekil 6.6. Deneylerde PVT'nin maksimum güç noktasındaki (MPP) anlık güç Değişimi 45

Şekil 6.7. Deneylerde PVT'de anlık elektrik veriminin değişimi..... 46

Şekil 6.8. Deneylerde PVT'de anlık termal verimliliğin değişimi 47

Şekil 6.9. Anlık nem içeriğinin değişimi 49

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.10. 1. gün deneylerinden taze ve kurutulmuş elma dilimlerinin fotoğrafları 50

Şekil 6.11. 2. gün deneylerinden taze ve kurutulmuş elma dilimlerinin fotoğrafları 51

Şekil 6.12. 3. gün deneylerinden taze ve kurutulmuş elma dilimlerinin fotoğrafları 51

Şekil 6.13. 4. gün deneylerinden taze ve kurutulmuş elma dilimlerinin fotoğrafları 52

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Yoğunlaştırılmış çanak kollektör tipleri 11

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
$\boldsymbol{A}$	Alan (m^2)
$\boldsymbol{c_p}$	Özgül ısı (kJ/kgK)
$\boldsymbol{\dot{E}_{el}}$	PVT panelden üretilen elektrik enerjisi (kW)
$\boldsymbol{\dot{E}_{güneş}}$	Güneşten kollektöre birim zamanda gelen enerji (kW)
$\boldsymbol{\dot{E}_{hava}}$	Havanın birim zamanda kazandığı enerji (kW)
$\boldsymbol{\dot{E}_{ısıl}}$	Birim zamanda elde edilen ısı enerjisi (kW)
$\boldsymbol{\dot{E}_{kayıp}}$	Birim zamanda kayıp enerji (kW)
$\boldsymbol{\dot{E}_{kul,ısı}}$	Birim zamanda kullanılabilir ısıl enerji (kW)
$\boldsymbol{f}$	Sıvı oranı
$\boldsymbol{g}$	Yer çekimi ivmesi (m/s^2)
$\boldsymbol{h}$	Isı taşınım katsayısı (W/m^2K)
h	Entalpi (kJ/kg)
$\boldsymbol{I}$	Güneş ışınımı (W/m^2)
$\boldsymbol{I_{PV}}$	Panelde üretilen akım (A)
$\boldsymbol{k}$	Isı iletim katsayısı (W/mK)
$\boldsymbol{m}$	Kütle (kg)
$\boldsymbol{\dot{m}}$	Kütlesel debi (kg/s)
$\boldsymbol{P}$	Basınç (Pa)
$\boldsymbol{R}$	Gaz Sabiti (kJ/kgK)
$\boldsymbol{t}$	Zaman (s)
$\boldsymbol{T}$	Sıcaklık (°C)
$\boldsymbol{U_{PV}}$	Panelde üretilen gerilim (V)
$\boldsymbol{W_R}$	Toplam belirsizlik
$\boldsymbol{v}$	Hız (m/s)
$\boldsymbol{\alpha}$	Emici plakanın güneş ışınımı yutma katsayısı (%)
$\boldsymbol{\beta}$	Genleşme katsayısı (1/K)

Simgeler	**Açıklamalar**
μ	Dinamik vizkozite (Pa.s)
$\boldsymbol{\eta}$	Verim (%)
$\boldsymbol{\rho}$	Yoğunluk (kg/m^3)
$\boldsymbol{\tau}$	Kolektör camının güneş ışınımını geçirgenliği (%)

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ADCARH	Kurutma odası çıkış havası bağıl nemi
CAVPVTD	Sabit hava debili PVT kurutucu
COP	Performans katsayısı
GDIP	Güneş destekli ısı pompası
HAV	Yüksek hava debili
HKIP	Hava kaynaklı ısı pompası
MDCÇHS	Maksimum kurutma odası çıkış havası sıcaklığı
PV	Fotovoltaik (photovoltaic)
PVT	Fotovoltaik-termal (photovoltaic-thermal)
PVTD	Fotovoltaik-termal kurutucu
PVTDIP	Fotovoltaik-termal destekli ısı pompası
PVTHP	Fotovoltaik-termal destekli ısı pompası
VAVPVTD	Değişken hava debili PVT kurutucu

1. GİRİŞ

Sanayileşmenin hız kazanması, nüfus artışının ivmelenmesi ve yaşam standartlarının yükselmesi günümüzde enerji talebini önemli ölçüde artırmıştır. Bununla birlikte, enerji ihtiyacının büyük kısmı hâlâ fosil yakıtlarla karşılanmakta ve bu durum CO_2 emisyonlarının belirgin biçimde artmasına yol açmaktadır. Güneş enerjisi teknolojileri, fosil yakıtlardan farklı olarak, bu talebi çevresel zarar vermeden karşılayabilecek bir potansiyele sahiptir. Ayrıca, binalarda ve endüstriyel alanlarda ısıtma ve elektrik ihtiyacını karşılayan, erişilebilir, sınırsız ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır.

Son yıllarda iklim değişikliği ve enerji güvenliği konularındaki endişeler, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemine dair küresel bir farkındalık yaratmıştır. Bu kaynaklar içinde, güneş enerjisi bol bulunabilirliği ve sürdürülebilir oluşu nedeniyle öne çıkmaktadır. Doğrudan güneş ışığından elektrik üreten fotovoltaik (PV) sistemlerin kullanımı yaygınlaşsa da, geleneksel PV sistemlerinin yüksek çalışma sıcaklıkları sebebiyle verim kaybı ve performans düşüşü gibi sorunlarla karşılaşması önemli bir engel oluşturmaktadır. Bu nedenle, araştırmacılar ve mühendisler güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini artırmak ve kullanım ömürlerini uzatmak amacıyla yenilikçi çözümler geliştirmeye hızla devam etmektedir. Bu çözümlerden biri, fotovoltaik ve termal teknolojilerin birbirine entegre edilmesiyle beraber bu yaklaşım fotovoltaik-termal (PVT) güneş kolektörlerinin gelişimine olanak tanımıştır. Bu bağlamda, PVT güneş kolektörlerinde enerji üretimini optimize ederken termal gerilmeleri azaltmayı hedefleyen yeni bir soğutma sistemi tasarımına ve performans analizine genel bir bakış sunulmaktadır [1].

PVT sistemlerinin tasarımında dikkate alınması gereken en önemli unsurlardan biri, PV modüllerinin optimum çalışma sıcaklıklarını koruyabilmek için termal yönetim ve özellikle soğutma stratejisidir. Aşırı ısınma, sistemin verimliliğini ve güvenilirliğini düşürerek etkin soğutma çözümlerinin gerekliliğini ortaya çıkarabilir. Bu bağlamda, doğal konveksiyon, cebri hava soğutma ve sıvı soğutma sistemleri gibi pasif soğutma teknikleri, araştırmacılar tarafından farklı PVT uygulamalarında değerlendirilmektedir. Ancak her soğutma yöntemi, verimlilik, maliyet, tasarım karmaşıklığı, çeşitli PV teknolojilerine uyumluluk, mevcut sistemlere entegrasyon ve geri ödeme süresi gibi yönleriyle dikkatle analiz edilmelidir.

Fotovoltaik-termal (PVT) kolektörler, hem elektrik hem de termal enerji üretimini tek bir cihazda birleştirerek önemli bir güneş enerjisi teknolojisi olarak öne çıkmaktadır [1-2]. Diğer yandan, tarımsal ürünlerin kurutulması, yüksek enerji maliyetleri ve kurutulan ürünün kalitesi gibi sorunlarla karşı karşıyadır. Sürdürülebilir güneş enerjili kurutuculardan yararlanmak, enerji maliyetlerinden ve enerji yoğun olan tarımsal ürünlerin kurutulması sürecinde kullanılan fosil yakıt miktarından tasarruf sağlayabilir [3]. Kurutma işlemlerinde güneş enerjisi kullanımı, tarım sektöründe yenilenebilir enerji kullanım oranını artırırken aynı zamanda sürdürülebilir bir üretim ve tüketim modeli sağlamaktadır [4, 5].

Kurutma, gıda muhafazası için sıklıkla kullanılan bir işlemdir [6]. Kurutma sistemleri için üreticiler ürünün daha kısa sürede kurumasını, uygun kalite kriterlerini karşılamasını, ekipman ve enerji maliyetini düşürmesini isterler. PVT kolektörler bu nedenle kurutma uygulamaları için uygun bir tasarım modeli olarak karşımıza çıkmaktadır. PVT'ler kurutma için gerekli tüm ısı ve elektrik enerjisini güneşten sağlayabilir [5]. Son zamanlarda araştırmacılar PVT kurutma sistemlerine odaklanmaktadır çünkü PVT sistemleri hem ısı hem de elektrik üretebilmektedir [5-7].

PVT sistem uygulamalarında PV yüzey sıcaklığının optimum değerlerde tutulabilmesi için karmaşık yapıdaki tasarımlar ve geri ödeme süreleri yüksek olması tasarımların ticarileştirme faaliyetlerinde uygulanabilirliği azaltan sebepler arasında yer almaktadır. PV modüllerinin yüzey sıcaklığı arttıkça verimlilikleri düşer. Hava debisinin yüzey sıcaklığına göre ayarlanması, sıcaklığın optimum seviyede tutulmasına yardımcı olur, böylece PV modüllerinin verimliliği korunur. Hava debisinin ihtiyaca göre ayarlanması, yalnızca gerekli miktarda soğutma yapılmasını sağlar. Bu, gereksiz enerji tüketimini azaltarak sistemin genel enerji tasarrufunu artırır. Yüksek sıcaklıklar PV modüllerinde termal stres yaratabilir, bu da sistemin ömrünü kısaltır. Hava debisinin sıcaklığa göre ayarlanması, termal stresleri azaltarak PVT sisteminin kullanım ömrünü uzatır. Hava debisinin yüzey sıcaklığına göre dinamik olarak ayarlanması, termal enerjinin daha verimli bir şekilde yönetilmesini sağlar. Bu durum, sistemin ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarına daha uygun bir performans sergilemesine olanak tanır. Ortam sıcaklığı, güneş ışınımı ve diğer çevresel koşullar değiştikçe, hava debisinin yüzey sıcaklığına göre kontrolü, PVT sistemlerinin bu değişikliklere daha hızlı uyum sağlamasını ve stabil bir performans göstermesini sağlar [8].

Bu tez çalışması kapsamında, sürdürülebilir yeni bir tip Fotovoltaik Termal (PVT) güneş kollektörlü kurutma sisteminin tasarımının yapılması, imal edilmesi, sayısal analizlerinin yapılması ve deneysel olarak test edilmesi gerçekleştirilmiştir. PVT sisteminden elde edilen ısının gıdaların işlenmesinde kullanılarak işletmelerdeki enerji maliyetinin azaltılmasını sağlayacak güneş enerjili yeni bir kurutucu modeli ortaya konulacaktır. PVT sistem uygulamalarında PV modüllerinin yüzey sıcaklığı arttıkça verimlilikleri düşer. Sistem tasarımlarında kullanılan ekipmanlar ile hava debisinin yüzey sıcaklığına göre ayarlanması, sıcaklığın optimum seviyede tutulmasına yardımcı olur, böylece PV modüllerinin verimliliği korunur. Hava debisinin sistemin ihtiyacına göre ayarlanması, yalnızca gerekli miktarda soğutma yapılmasına olanak sağlarken aynı zamanda gereksiz enerji tüketimini azaltarak sistemin genel enerji verimliliğini artırır. Yüksek sıcaklıklar PV modüllerinde termal stres yaratabilir, bu da sistemin ömrünü kısaltır. Hava debisinin sıcaklığa göre ayarlanması, termal stresleri azaltarak PVT sisteminin kullanım ömrünü uzatır. Hava debisinin yüzey sıcaklığına göre dinamik olarak ayarlanması, termal enerjinin daha verimli bir şekilde yönetilmesini sağlayabilir. Bu durum, sistemin ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarına daha uygun bir performans sergilemesine olanak tanır. Ortam sıcaklığı, güneş ışınımı ve diğer çevresel koşullar değiştikçe, hava debisinin yüzey sıcaklığına göre kontrolü, PVT sistemlerinin bu değişikliklere daha hızlı uyum sağlamasını ve stabil bir performans göstermesini sağlar. Yalnızca gerektiğinde yüksek hava debisi kullanıldığı için sistem daha sessiz çalışabilir. Ayrıca, enerji tüketimi daha dengeli olduğu için işletme maliyetleri de azalır. Bu avantajlar, PV modüllerinin daha stabil ve verimli çalışmasına yardımcı olacaktır, sistemin genel enerji dönüşüm performansını ve uzun vadeli maliyet etkinliğini de artırır. Böylelikle enerji verimli ve sürdürülebilir bir sistem tasarlanması hedeflenmiştir. Ayrıca sürdürülebilir kontrol yaklaşımı sunan yeni bir tip PVT destekli bir kurutucu tasarımı ve test edilerek performansının analiz edilerek ortaya konulması amaçlanmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Güneş Enerjisi

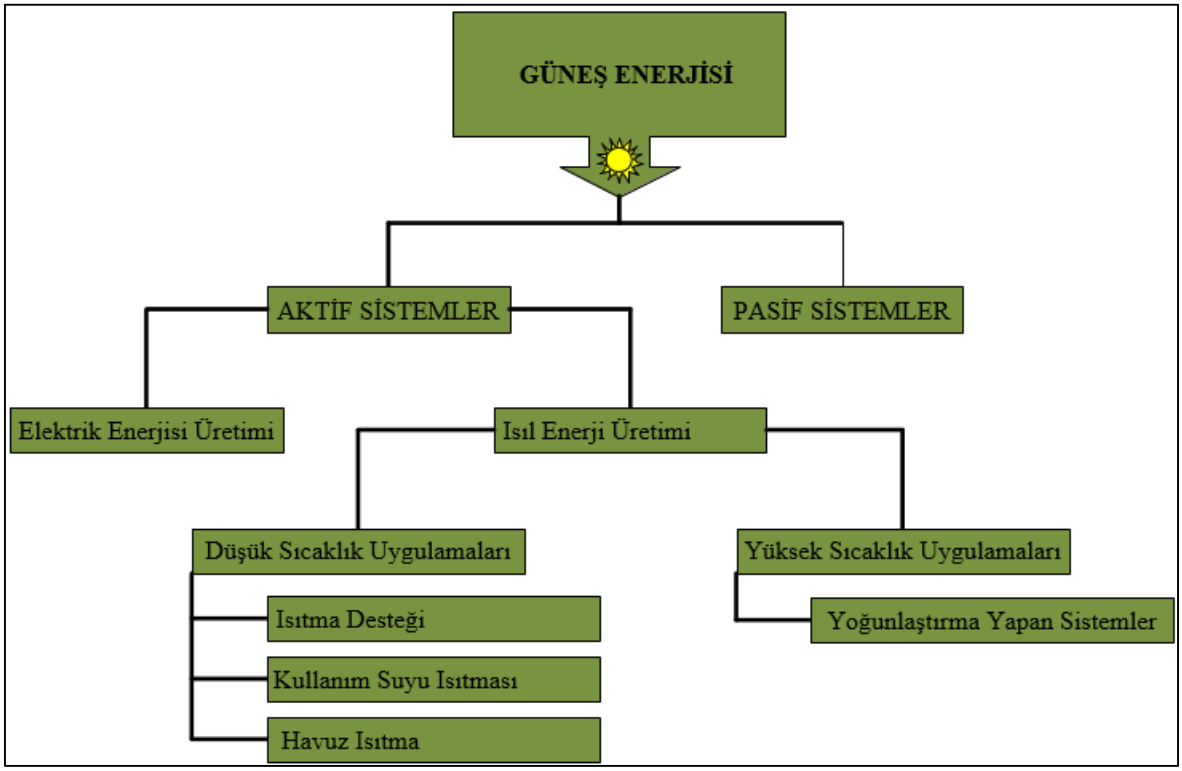
Güneş, devasa boyutlarıyla evrenin enerjisini sürekli olarak üreten bir termonükleer füzyon reaktörüdür. Bu süreçte, hidrojen atomları helyuma dönüşerek muazzam bir enerji açığa çıkarır. Güneşin merkezinde üretilen bu enerji, katmanlardan geçerek dış yüzeye ve oradan da uzaya yayılır. Dünya'ya ulaşan güneş ışınları ve radyasyon, gezegenimizde ışık ve ısı olarak algılanır. Atmosfer, gelen güneş enerjisinin bir kısmını emer, bir kısmını uzaya geri yansıtır ve bir kısmını yeryüzüne iletir. Bu enerji, canlı yaşamı destekleyen ve doğadaki pek çok süreci harekete geçiren temel bir kaynak olmasının yanı sıra, güneş panelleri gibi teknolojilerle ısı ve elektrik üretiminde de kullanılmaktadır. Bu nedenle güneş enerjisi, hem gezegenimizin ekosistemi hem de sürdürülebilir enerji çözümleri açısından hayati bir öneme sahiptir.

Güneşten gelen enerjinin yaklaşık %30'u atmosfer ve yüzey tarafından uzaya geri yansıtılırken, %20'si atmosfer tarafından emilir. Geriye kalan %50'si ise yeryüzüne ulaşarak burada tutulur. Dünya'ya gelen toplam enerjinin yaklaşık 3,8×10^23 kW'lık kısmının yalnızca 1,8×10^14 kW'ı yeryüzü tarafından emilirken, geri kalanı uzaya geri yansıtılır. Bu enerji, Dünya'nın sıcaklık dengesinin korunmasında ve iklim sisteminin işleyişinde önemli bir rol oynar. Ayrıca, rüzgarların oluşumu, okyanus akıntıları ve diğer doğal süreçler bu enerji sayesinde gerçekleşir. Güneş enerjisi, insanlar tarafından elektrik üretimi ve ısıtma gibi pratik amaçlar için doğrudan kullanılabilir. Sürdürülebilir, düşük maliyetli ve çevre dostu olması, güneş enerjisini hem ekonomik hem de çevresel açıdan cazip bir seçenek haline getirmektedir [9].

Güneş enerjisinin en büyük avantajlarından biri, hem ısı hem de elektrik üretebilmesidir. Bu yönüyle diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından ayrılır. Ancak, güneş ışığının sürekliliği ve yoğunluğunun hava koşulları gibi faktörlere bağlı olması, bu enerji kaynağının bazı dezavantajlarını oluşturur. Bu nedenle, güneş enerjisini depolamak kritik bir ihtiyaçtır. Enerji depolama sistemleri, güneş enerjisinin kararlılığını artırarak kesintisiz bir enerji kaynağı sunulmasını sağlar ve güneş enerjisinin potansiyelinden daha verimli bir şekilde yararlanılmasına olanak tanır.

2.1.1. Güneş enerjisi sistemleri

Güneş enerjisi, ısı ve elektrik üretimi gibi çok çeşitli alanlarda kullanılabilen yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Konut ve ticari binaların ısıtılmasından tarım ürünlerinin kurutulmasına, seralarda toprak ve ortam sıcaklığının düzenlenmesine kadar geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir. Özellikle son yıllarda, güneş enerjisinin elektrik üretiminde kullanımının yaygınlaştığı gözlemlenmektedir. Bu enerji kaynağı, hem aktif hem de pasif yöntemlerle ısı enerjisi olarak değerlendirilebildiği gibi, yarı iletken malzemelerin kullanımıyla elektrik enerjisine dönüştürülmesi de mümkündür. Pasif sistemler, güneş enerjisini kış aylarında ısı kazancı sağlamak, yaz aylarında ise doğal havalandırma ve soğutma amaçlı kullanmak için tasarlanmaktadır. Şekil 2.1'de, güneş enerjisinin farklı uygulama alanları detaylı bir şekilde gösterilmektedir [10].



Şekil 2.1. Güneş enerjisinin uygulama alanları [10]

2.1.2. Güneş enerjisinden ısı enerjisi elde edilmesi

Günümüzde konut ve binaların ısınma ile sıcak su ihtiyacını karşılamak, özellikle kış aylarında yüksek enerji tüketimine yol açmaktadır. Türkiye gibi ülkelerde bu enerji

ihtiyacının büyük bir bölümü fosil yakıt kaynaklarından sağlanmaktadır. Ancak, teknolojik gelişmeler sayesinde güneş enerjisi kullanılarak enerji tüketiminin bir kısmını azaltmak mümkün hale gelmiştir. Düşük sıcaklık seviyelerinde (20 - 100 °C) etkili bir şekilde çalışan düzlemsel ve vakum tüplü güneş kolektörleri, ısınma ve sıcak su sağlamak için evlerde uygulanabilir alternatifler sunmaktadır. Güneş enerjisinden elde edilen termal enerji; düşük (20 - 100 °C), orta (100 - 300 °C) ve yüksek sıcaklık (> 300 °C) aralıklarında farklı uygulamalarda değerlendirilebilmektedir.

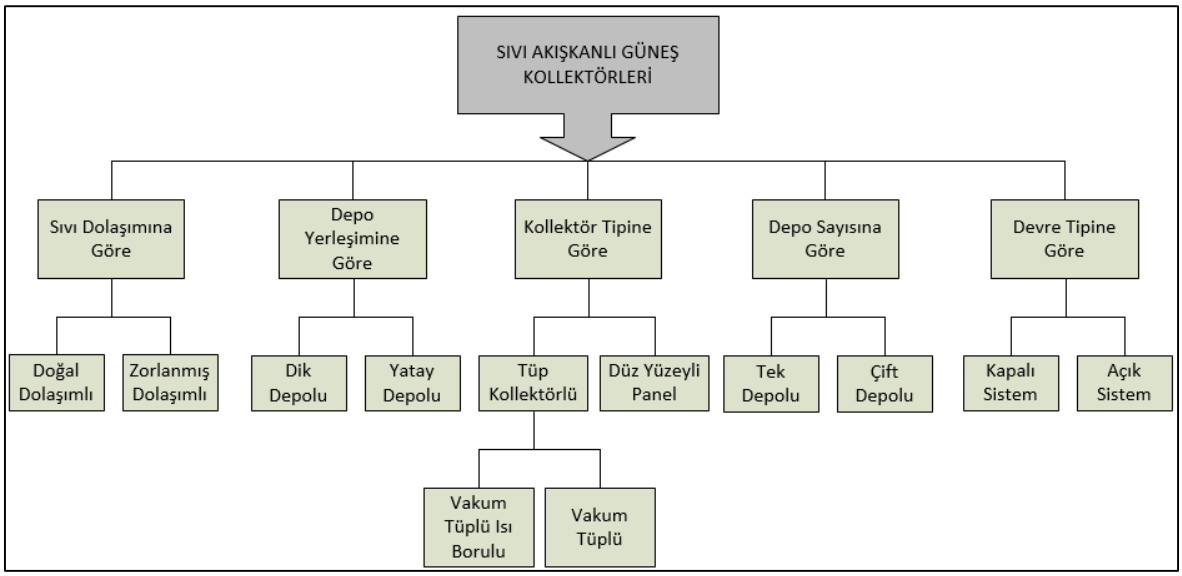
Güneş enerjisiyle ısıtma sistemleri, güneş kolektörünün absorbe ettiği ısıyı farklı akışkanlar vasıtasıyla transfer eden sistemlerdir. Isıyı havaya aktaran kolektörler havalı güneş kolektörleri olarak adlandırılırken, ısıyı bir sıvıya aktaran sistemler sıvılı güneş kolektörleri olarak bilinmektedir. Bu sistemlerde kullanılacak akışkanın türü, elde edilen enerjinin kullanım amacına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Örneğin, konutlarda, tarımsal faaliyetlerde veya endüstriyel süreçlerde sıcak su elde etmek amacıyla genellikle sıvı akışkanlı güneş kolektörleri tercih edilmektedir. Buna karşılık, konut, sera veya kurutma işlemleri gibi bir mekanın ısıtılması gereken durumlarda havalı güneş kolektörleri daha uygun bir seçenek sunmaktadır. Yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda ise sıvılı güneş kolektörlerinde ısı transfer kapasitesi yüksek yağlar kullanılabilmektedir [11].

Bir güneş kolektörünün tasarımında dikkate alınması gereken üç temel unsur bulunmaktadır. İlk olarak, güneş enerjisinin kolektör yüzeyi tarafından ne kadar etkin bir şekilde absorbe edildiği değerlendirilmelidir. İkinci olarak, kolektör yüzeyinden çevreye gerçekleşen termal kayıplar minimize edilmelidir. Son olarak, kolektör yüzeyinin absorbe ettiği enerjinin ne kadarının akışkana başarıyla transfer edildiği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu faktörlerin optimizasyonu, güneş kolektörlerinin verimli bir şekilde çalışması için hayati öneme sahiptir [12].

Sıvı bazlı güneş kollektörleri

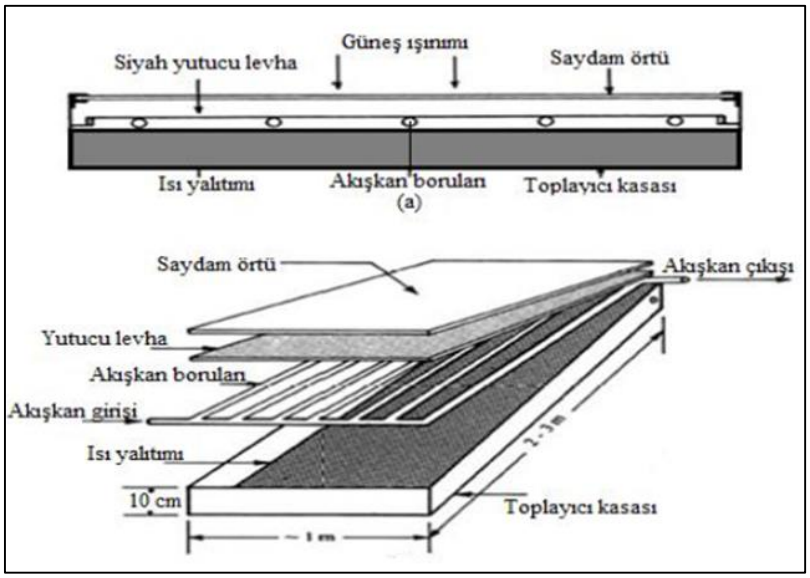
Sıvı akışkanlı güneş kollektörlerinde güneşten emilen ısı bir sıvı akışkana aktarılarak taşınmaktadır. Bu tip kollektörlerde ısı iletim katsayısı yüksek olan su en çok kullanılan sıvıdır. 100 ℃ sıcaklığa kadar ısı ihtiyacı olan uygulamalara enerji sağlamak için kullanılabilecek en uygun ve en ekonomik akışkandır. Şekil 2.2'de çeşitli sıvı akışkanlı güneş kollektörleri için sınıflandırılma yapılmıştır. Bu kollektörler; sıvı dolaşımına, depo

yerleşimine, kollektör tipine, depo sayısına, ve devre tipine göre birbirinden ayrılırlar [13].



Şekil 2.2. Sıvı bazlı güneş kolektör türleri [13]

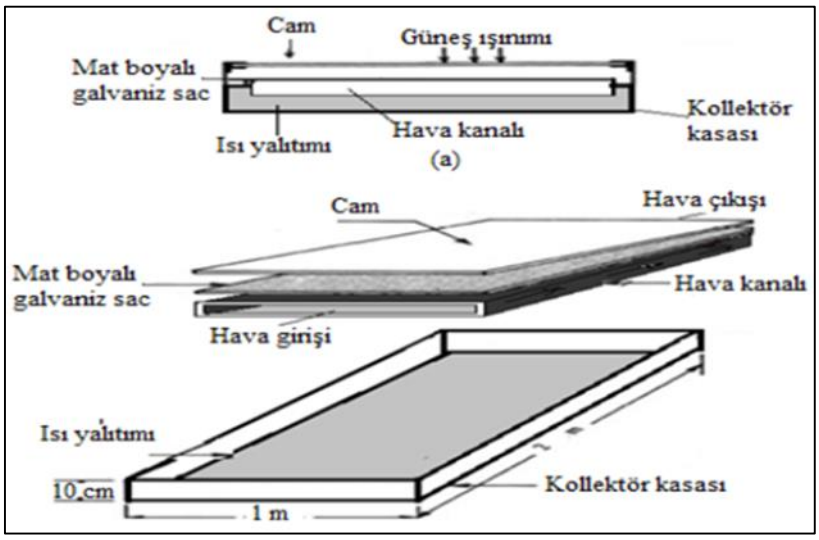
Şekil 2.3'te bir sıvı akışkanlı güneş kollektörünün yapısal detayları gösterilmektedir. Bu tür bir kollektör, camdan üretilmiş saydam bir örtü, saydam örtü ile siyah yutucu levha arasındaki boşluk, siyah yutucu levha, ısı yalıtımı, yutucu levha ile yalıtım arasındaki akışkan boruları ve tüm bu bileşenleri kapsayan bir dış kasa gibi temel bileşenlerden oluşmaktadır. Yutucu levhanın yüzeyi genellikle koyu renkte olup, bazen farklı özelliklere sahip bir kaplama malzemesiyle desteklenmektedir. Akışkan boruları, yüksek ısı iletkenliğine sahip bakır veya alüminyum gibi metallerden imal edilmektedir. Güneş kollektörlerinin iç ve dış yalıtımında ise cam yünü veya poliüretan köpük gibi malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Kollektörlerin kurulum açısı, bulundukları bölgedeki güneş ışınımından en yüksek verimle faydalanılacak şekilde optimize edilmektedir [13].



Şekil 2.3. Sıvı akışkanlı güneş kollektörünün yapısal gösterimi [14]

Havalı güneş kollektörleri

Şekil 2.4'te gösterildiği üzere, havalı güneş kollektörlerinde güneşten absorbe edilen termal enerji, hava akışı aracılığıyla taşınmaktadır. Bu tip kollektörler, sıcak hava üretiminde kullanılabilecek en temel ve ekonomik yöntemlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Havalı bir güneş kollektörünün kesit görünümü Şekil 2.4'te sunulmuştur.



Şekil 2.4. Havalı güneş kollektör sisteminin detay gösterimi [14]

Havalı güneş kollektörleri genellikle camdan imal edilmiş bir geçirgen örtü, güneş enerjisini

absorbe eden siyah emici (absorban) levha, bu levhaya entegre edilmiş veya levhanın alt kısmına yerleştirilmiş hava kanalları, yan ve arka yüzeylerde yer alan ısı yalıtım malzemesi ile bu bileşenleri kapsayan bir toplayıcı kasa bileşiminden oluşmaktadır. Bu kollektörlerde, güneş enerjisini absorbe eden ve bu enerjiyi hava akışına aktaran emici levha, sistemin en kritik bileşeni olarak öne çıkmaktadır. Havalı güneş kollektörlerinin ısıl performansını artırmada, emici levhanın tasarımı en belirleyici unsurların başında gelmektedir.

Son yıllarda, gelişen teknoloji ve üretim teknikleriyle birlikte, havalı güneş kollektörleri için çeşitli yenilikçi tasarımlar, farklı malzeme kullanımları ve imalat yöntemleri geliştirilmiştir. Bu tasarımların temel amacı, havalı güneş kollektörlerinin ekonomik ve sürdürülebilir olmasının yanı sıra, ısıl verimliliğin artırılmasını sağlamaktır. En sık tercih edilen tasarımlar arasında, sisteme ısıl enerji depolama malzemelerinin entegre edilmesi, emici levhanın alt kısmına farklı kanatçık yapılarına sahip tasarımların yerleştirilmesi, hava ile emici levha arasındaki temas sayısını artıran çift veya çok geçişli sistemlerin tasarlanması ve emici levhaya farklı yüzey şekilleri kazandırılması yer almaktadır. Bu tasarımsal yeniliklerin ortak hedefi, güneş enerjisinin en verimli şekilde absorbe edilmesini ve hava ile yutucu yüzey arasındaki temasın maksimum düzeye çıkarılmasını sağlamaktır [13,14].

Havalı güneş kollektörleri, mahal ısıtma, tarımsal ürünlerin kurutulması ve seraların ısıtılması gibi çeşitli uygulamalarda sıcak hava üretimi için yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak bu sistemlerin sürdürülebilirliğini sağlamak adına, güneş enerjisinin depolanması büyük önem taşımaktadır. Son dönemde, ısıl enerjinin depolanmasında kullanılan faz değiştiren malzemeler gibi ileri teknoloji ürünlerinin havalı güneş kollektörlerine entegre edilmesi giderek yaygınlaşmıştır. Bu gelişmeler, güneş enerjisinin daha verimli kullanılmasını mümkün kılarken, enerji depolama kapasitesini artırarak sistemlerin genel performansını da iyileştirmektedir.

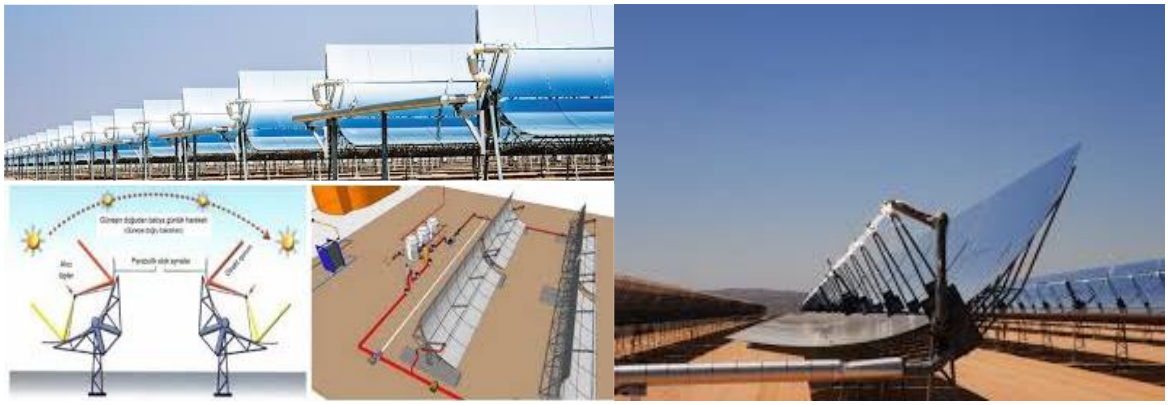
2.1.3. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde edilmesi

Güneş enerjisinden, güneş ışınımından yüksek sıcaklık uygulaması olarak adlandırılan yoğunlaştırıcı sistemler ve güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çevirebilen yarı iletken teknolojisine dayanan fotovoltaik (PV) sistemler ile elektrik enerjisi elde edilmektedir. Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle beraber güneşten elektrik enerjisi elde

edilen teknolojiler de hızlı bir şekilde gelişmektedir ve kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır.

Yoğunlaştırıcı sistemler

Güneş enerjisi uygulamalarında, yüksek sıcaklık gereksinimi duyulan sistemlerde düzlemsel kollektörler yerine güneş ışınımını bir odak noktasında yoğunlaştıran sistemler tercih edilmektedir. Bu yoğunlaştırıcı sistemler, parabolik kollektörlerin odak noktasında oluşan yüksek sıcaklık sayesinde kızgın buhar üreterek elektrik enerjisi sağlamaktadır. Bu tür sistemler, genel olarak güneş ısıl güç santralleri olarak adlandırılmaktadır. Güneş enerjisini odaklama ve toplama işlemi, kullanılan kollektör tipine bağlı olarak parabolik çanak, parabolik oluk, güneş güç kuleleri ve aynalı yoğunlaştırıcılar gibi çeşitli teknolojilerle gerçekleştirilebilmektedir. Parabolik kollektörlerin kullanıldığı güç santrallerine ait bir örnek Resim 2.1'de sunulmuştur. Bu sistemlerde, kolektörlerin odak noktasında bulunan emici borular içinde dolaştırılan çalışma sıvısı ısıtılarak bir ısı değiştiricisine aktarılmakta ve burada kızgın buhar elde edilmektedir. Parabolik çanak kolektörlerde ise benzer bir yöntem uygulanmakta veya odak noktasında yer alan bir Stirling motoru kullanılarak doğrudan elektrik üretimi sağlanabilmektedir. Bir diğer elektrik üretim yöntemi ise merkezi toplayıcılı sistemlerde, güneş ışınlarının düzlemsel aynalar aracılığıyla alıcı olarak adlandırılan ısı değiştiricisine yönlendirilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Bu sistemde, çalışma sıvısı alıcıda ısıtılarak geleneksel yöntemlerle elektrik enerjisine dönüştürülmektedir [16].

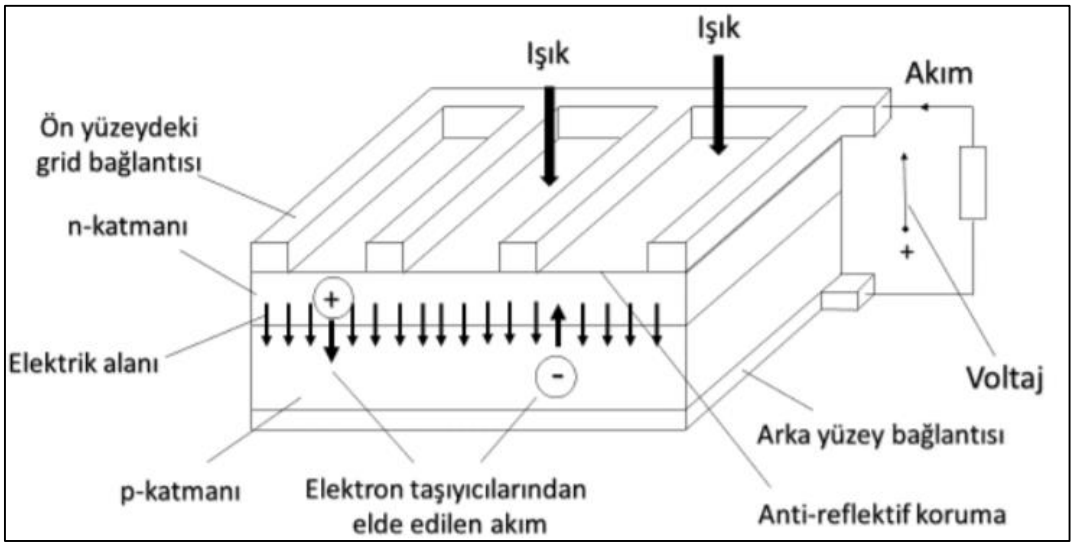


Resim 2.1. Yoğunlaştırılmış çanak kollektör tipleri [16]

Fotovoltaik güneş panelleri

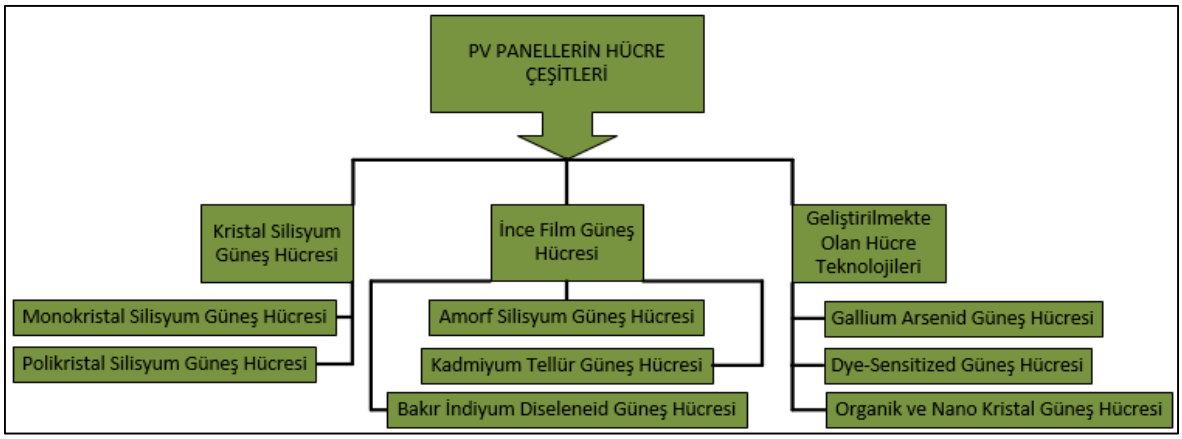
Fotovoltaik güneş panelleri, enerji sektöründe hızla gelişen ve sürdürülebilir enerji üretiminde kritik bir rol oynayan teknolojilerden biridir. İlk olarak 1950'lerde geliştirilmeye başlanan bu teknoloji, günümüzde fosil yakıtlara alternatif bir enerji kaynağı olarak dikkat çekmektedir. Güneş panelleri, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken malzemelerden oluşur ve bu özellikleriyle güneş ışığının erişebildiği hemen her bölgede enerji üretimi için kullanılabilir. Genellikle kare, dikdörtgen veya dairesel hücrelerden meydana gelen panellerin standart hücre boyutları 125 x 125 mm veya 156 x 156 mm olup, kalınlıkları 0,15 mm ile 0,2 mm arasında değişir. Panellerin temel çalışma prensibi, yüzeylerine ulaşan güneş ışığını elektrik gerilimine dönüştüren fotovoltaik etkiyle ilişkilidir. Bu etki, güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesini mümkün kılar.

Fotovoltaik panellerin işleyişi, yarı iletken malzemeler üzerine düşen fotonların enerji aktarımı sonucu elektronları yerinden koparması ve bu serbest elektronların bir elektrik akımı oluşturmasıyla gerçekleşir. Genellikle bir N tipi ve bir P tipi yarı iletken katmandan oluşan bu sistemler, farklı kimyasal katkı maddeleriyle optimize edilir. N tipi yarı iletkenler, silisyum matrisine periyodik tablonun 5. grubundan fosfor gibi bir elementin ilave edilmesiyle üretilir. Fosfor atomu, dış yörüngesinde silisyumdan bir fazla elektrona sahip olduğu için, güneşten gelen fotonların enerjisiyle bu fazla elektronu serbest bırakır. P tipi yarı iletkenler ise silisyum yapısına periyodik tablonun 3. grubundan bor, indiyum veya alüminyum gibi elementlerin eklenmesiyle elde edilir. Bu elementler, son yörüngelerinde eksik elektrona sahip olduklarından, N tipi katmandan P tipi katmana doğru bir elektron akışına olanak tanır. Böylece, yarı iletken yapı üzerine düşen güneş ışığı süreklilik arz ettiği sürece doğru akım üretimi sağlanır.



Şekil 2.5. Fotovoltaik hücrelerin elektrik üretim süreci şeması [17]

Fotovoltaik panellerde kullanılan güneş hücreleri, Şekil 2.6'da sınıflandırıldığı şekilde farklı türlere ayrılmaktadır. Günümüzde en yaygın olarak tercih edilen hücre tipi, yüksek verimliliğiyle öne çıkan monokristal silisyum hücreleridir. İnce film güneş hücreleri ise, mono ve polikristalin hücrelere kıyasla daha düşük maliyetli olmalarıyla dikkat çeker, çünkü bu hücrelerin yapılarını oluşturan katmanlar daha ince olup, üretim süreçlerinde daha az hammadde kullanılmaktadır. Ancak, bu hücrelerin verimliliği, kristal silisyum hücrelerine oranla daha düşüktür. Diğer taraftan, alternatif güneş hücreleri, polimer veya organik malzemeler kullanılarak geliştirilmektedir ve bu hücreler, düşük maliyet, hafiflik, çevre dostu özellikler ve yüksek verimlilik gibi avantajlar sunmaktadır. Fotovoltaik panellerin verimliliği her geçen gün artmakta olup, günümüzde bu verimlilik %21 seviyelerine ulaşmış, optik yoğunlaştırıcılar kullanılarak ise verimlilik %35'e kadar çıkarılabilmektedir.



Şekil 2.6. Fotovoltaik panellerde kullanılan çeşitli güneş hücresi türleri [18]

Fotovoltaik-termal güneş panelleri

Güneş hücreleri, en yüksek verimliliğe yaklaşık 25°C'lik bir çalışma sıcaklığında ulaşır. Ancak, bu sıcaklığın üzerine çıkıldığında, hücrelerin verimliliği azalmakta ve çıkış gerilimleri düşmektedir. Yapılan araştırmalara göre, her 1°C'lik sıcaklık artışı, güneş hücrelerinin verimliliğinde ortalama %0,4 ile %0,5 arasında bir azalmaya yol açmaktadır. Bu durumu tersine düşündüğümüzde, 10°C'lik bir sıcaklık düşüşü, hücre verimliliğinde yaklaşık %5'lik bir artışa sebep olmaktadır. Bu nedenle, fotovoltaik güneş panellerinde verimlilik kayıplarını önlemek amacıyla panellerin soğutulması kritik bir öneme sahiptir.

Güneş ışınımı altında çalışan fotovoltaik panellerin soğutulması sırasında hem elektriksel enerji hem de ısı enerjisi elde edilmektedir. Bu tür paneller, fotovoltaik-termal güneş panelleri olarak tanımlanır. Fotovoltaik panellerin soğutulmasında; su, hava, soğutucu akışkanlar, nanoakışkanlar gibi çeşitli akışkanlar kullanılmaktadır [19].

2.2. Fotovoltaik Panel Soğutma Uygulamaları

2.2.1. PVT destekli soğutma sistem uygulamaları

PV modülleri, güneş ışığından gelen ışınımların ortalama % 4-17'sini elektriğe dönüştürebilmektedir. Bu durum modülde kullanılan malzeme ve sistemin çalışma koşullarına göre değişiklik gösterir. Sonuç olarak çok daha fazla güneş enerjisi ısıya dönüştürülmüş olur. Ortam sıcaklığının yüksek olduğu yerlerde PV'nin verimi düşürebilir ve modüllerin zarara uğramasına neden olabilir [20]. PVT sistemleri, elektrik ve ısı üretebilir, sistemden çekilene ısı sayesinde hücrelerin yüzey sıcaklığında düşüşler olabilir. PVT panel hava kaynaklı ısı pompası (HKIP) ile birleştirildiğinde fotovoltaik termal destekli ısı pompası (PVTDIP) olarak adlandırılabilir. Bu sistemler binalar için gelecekte ısıtma, kullanım sıcak suyu ve hatta soğutma bile sağlayabilir. PVTDIP sisteminde, PVT panelleri sadece ısı sağlamakla kalmayıp aynı zamanda elektrik de üretebildikleri için, PVT paneller ısı pompası sistemleri ile kombine sistemler olarak kullanımı yaygınlaşmaktadır [21].

PVTDIP sistemleri de GDIP sistemleri gibi doğrudan ve dolaylı genleşmeli olmak üzere ikiye ayrılarak ele alınabilir. Isı pompası sisteminin evaporatörü PV panelin gövde yapısına entegreli ve PV panelden direkt olarak ısıyı alıyorsa doğrudan genleşmeli olarak

adalandırılır. Eğer PV panel soğutulması yapılırken hava, su gibi ikinci bir akışkan kullanılıyorsa ve evaporatör bu akışkandan ısıyı kendi bünyesine çekiyorsa bu durum dolaylı genleşmeli bir sistemi tanımlamaktadır [21]. Bu sistemden ayrıca güneş enerjisinden elektrik de üretildiği için ısı pompası sisteminin enerji tüketen malzemeleri kompresör ve fanları için gerekli enerji panellerden karşılanabilir.

Isı pompası sistemlerinin performansı, bir dizi faktörden büyük ölçüde etkilenir. Dış ortam koşulları, kurulum yerinin özellikleri ve bina yapısal özellikleri gibi faktörlerin yanı sıra güneş ışınımı, rüzgar gibi değişkenler de performansını etkiler. Bu nedenle, gerçek dünya koşullarında sistemlerin performansı, üreticilerin teknik veri sayfalarında belirtilen laboratuvar koşullarında gözlemlenen performanslardan farklı olabilmektedir [22].

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu tez çalışması için aşağıdaki çalışmalar incelenmiştir. Farklı PVT tasarım çalışmaları, PVT sistemlerinde atık ısının kullanımı, PVT sistemlerinde enerji verimliliği ve PVT sistemlerine entegre kurutma uygulamaları ile ilgili kaynaklar taranmıştır.

Barnwal ve Giwari [23], yeşil (olgunlaşmamış) ve sarı (tam olgunlaşmış) üzümleri hem açık havada hem de hibrit bir PVT sera kurutucusunda kurutmuşlardır. Tam olgunlaşmış üzümlerin kuruma süresi, olgunlaşmamış üzümlerinkinden daha kısa olmuştur. Buharlaşan nem miktarı, rüzgar hızının daha yüksek bir değere sahip olması ve bunun bağıl nem ile birleşik etkisi nedeniyle sera koşullarına kıyasla açık koşullarda daha fazla olmuştur. Ancak, bu durumun yüksek hava akış hızları ile aşılabileceğini belirtmişlerdir. Kong ve ark. [24], taze turpları iki farklı PVT'de doğru akım (DC) fanları kullanarak kurutmuşlardır. Amorf silikon PVT'nin ortalama ısıl verimliliği %46.8, ortalama elektriksel verimliliği ise %5.7 olarak ölçülmüştür. Polikristalin silikon PVT'nin ortalama ısıl verimliliği %40.7, ortalama elektriksel verimliliği ise %6.8 olarak bulunmuştur. Fan sayısını artırarak kuruma süresini 10 saat kısaltmışlardır. Fterich ve ark. [25], bir PVT kurutucuda domates dilimlerinde kurutma sıcaklığının, dilim kalınlığının ve hava kurutma hızının ısı ve kütle transfer dağılımı üzerindeki etkilerini incelemek için bir sayısal simülasyon geliştirmiş ve bunu deneysel olarak test etmişlerdir. Gupta ve ark. [26], yeşil çayı kurutmak için bir PVT kurutucu geliştirmiş ve karışık mod, dolaylı mod doğal konveksiyon ve zorlanmış konveksiyonun PVT performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. En uygun kurutma performansını karışık modda, ortalama PVT kurutma verimliliği %26.34 ve özgül nem çıkarma oranı (SMER) 0.3560 kg/kWh ile elde etmişlerdir. Ayrıca, karışık modda PVT kolektör verimliliğinin maksimum değerini %39.67 olarak bulmuşlardır. Gupta ve ark. [27], yeşil biberleri kurutmak için bir PVT kurutucu geliştirmiştir. PVT kurutucunun deney süresince 8 saatlik ısıl enerji, elektrik enerjisi ve toplam ısıl enerji değerleri sırasıyla 0.409, 0.859 ve 1.933 kWh/gün olarak ölçülmüştür. Ayrıca, PVT güneş enerjili kurutucunun ortalama elektriksel verimliliği %12.29, ısıl verimliliği %18.81 ve toplam ısıl verimliliği %51.18 olarak bulunmuştur. Dorouzi ve ark. [28], bir PVT rejenerasyon sistemi ile sıvı desikant destekli bir güneş kurutucu geliştirmiş ve bunu domatesleri kurutarak test etmiştir. En yüksek elektrik enerjisi tüketimi %28 bağıl nem ve 70 °C sıcaklıkta gözlemlenmiştir. Domateslerin 70 °C yerine 60 °C'de kurutulması durumunda, güneş enerjisinden elde edilen

elektrik ile tüketilen elektrik arasındaki oranın yaklaşık 2.2 kat daha yüksek olduğu bulunmuştur. Gupta ve ark. [29], tasarlanan PVT kurutucunun çevresel ve ekonomik değerlendirmesini yapmış ve elektriksel, ısıl ve toplam ısıl verimlilikleri sırasıyla %12.99, %50.79 ve %84.99 olarak tespit etmişlerdir. Ayrıca, PVT kurutucunun enerji geri ödeme süresi 1.45 yıl olarak hesaplanmıştır.

Kong ve ark. [30], PVT ve rüzgar türbini ile çalışan hibrit bir kurutma sistemi geliştirmiş ve Panax notoginseng'in ana kök, rizom ve lifli köklerini açık hava kurutmasıyla karşılaştırmalı olarak kurutmuştur. Ana kök dilimlerinde kurutma süresi %33.3, rizomlarda %74.1 ve lifli köklerde %53.8 oranında açık hava kurutmasına kıyasla kısalmıştır. Ayrıca, hibrit kurutucunun geri ödeme süresini yaklaşık 1.03 yıl olarak hesaplamışlardır. Tiwari ve ark. [31], bir karışık mod PVT sera güneş kurutucusu geliştirmiş ve üzüm kurutmuştur. Kurutucunun tüm çatısını fotovoltaik panellerle kaplamış ve fotovoltaik modülün altına ek cam yerleştirmişlerdir. Bu yöntemle, üründen çevreye olan ısı transfer katsayısı ve ürüne gelen güneş ışınımı azaltılmış, ürünün yavaşça ısınması sağlanmış ve ürün kalitesi artırılmıştır. Fterich ve ark. [32], zorlanmış konveksiyonlu bir PVT kurutucuda domatesleri kurutmuştur. 65°C'de kurutulan domateslerin nem içeriği %91.943'ten %22.32'ye düşmüştür. PVT'nin ısıl verimliliği %26-65 arasında, elektriksel verimliliği ise %7.5-12.31 arasında değişmiştir.

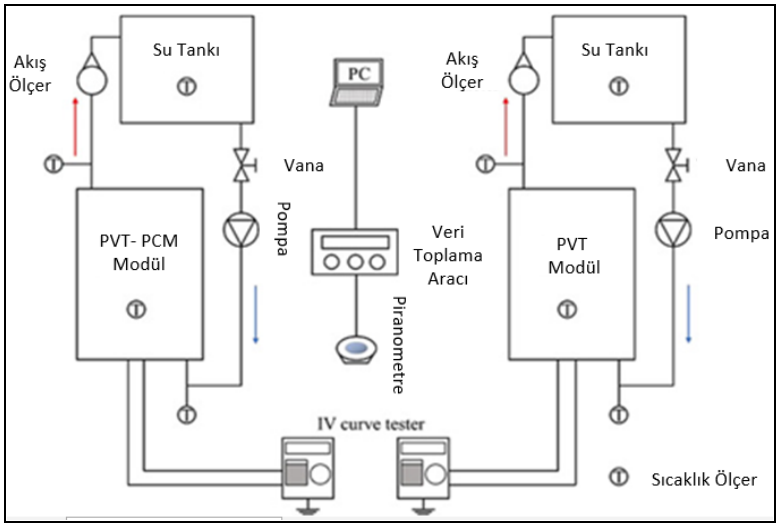
Yukarıdaki literatürden anlaşıldığı üzere, PVT kurutucuların farklı ürünleri etkili bir şekilde kurutabildiği gözlemlenmiştir. Çalışmalar özellikle domates kurutmaya odaklanmıştır. Elma, dünya genelinde yaygın olarak yetiştirilen popüler bir meyvedir. Taze elmaların raf ömrü, kurutma işlemi kullanılarak uzatılabilir [7]. Elmalar, orijinal özelliklerini korumak için çeşitli yöntemlerle kurutulabilir. Kurutulduktan sonra elmalar tüketilebilir ya da ikincil hammaddelerin üretiminde işlenebilir [6]. Mevcut çalışmalarda, elma dilimleri farklı kurutma hava sıcaklıklarında ve 1.5 m/s hava hızında kurutulmuştur. Elma dilimleri, güneş takip sistemiyle donatılmış bir güneş hava kurutucusunda 45 °C'de [33], konveksiyonlu sıcak hava kurutucusunda 50-70 °C'de [34], ve siklon kurutucusunda 60-80 °C'de [35] kurutulmuştur. Çalışmalara göre, ideal kurutma sıcaklığı 1.5 m/s hava hızında 40 °C olarak belirlenmiş ve bu durum mevcut çalışmada da dikkate alınmıştır.

PVT kolektöründe PV arka yüzeyini etkili bir şekilde soğutmak ve ısıyı verimli bir şekilde uzaklaştırmak için çeşitli tasarımlar önerilmiş ve araştırılmıştır. Hava tabanlı PVT

sisteminde çoğunlukla kanat tasarımları [36,37] tercih edilse de ∇-oluk [38], çıtalar [39], üçgen blok [40] ve delikli bölme [41] gibi tasarımlar da kullanılmaktadır. Ayrıca atık alüminyum [42] ve metal köpükler [43] gibi malzemelerinde ısı iletiminde başarılı oldukları için kullanıldığı görülmektedir. Kim ve arkadaşları [44] kanatçık kullanımının PVT yüzey sıcaklığını 7,4 ℃ düşürdüğünü ve verimin %2,72 arttığını bildirmiştir. PVT kolektöründe V-şekilli kanatçıkların kullanıldığı bir başka çalışma, elektriksel ve termal verimliliğin sırasıyla %28,7 ve %30,6 oranında arttığını göstermiştir [45].

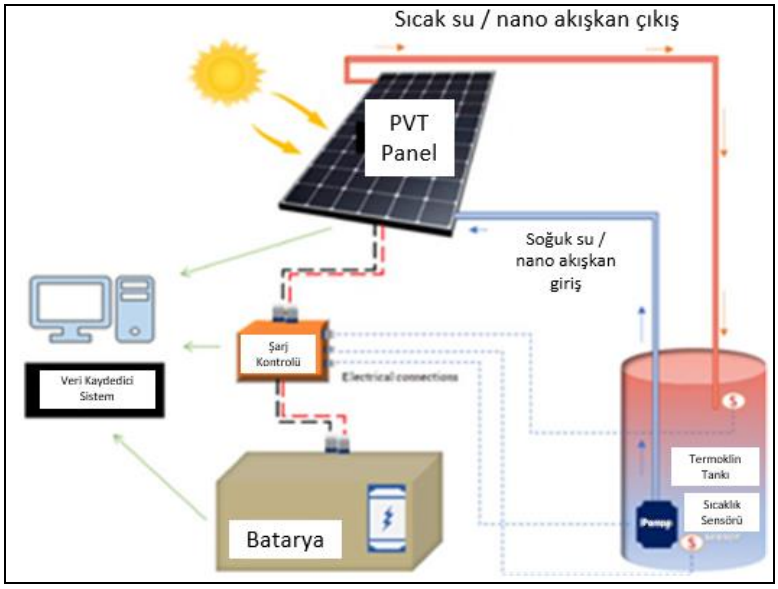
Elma kurutma [7,35] çalışmaları, domates kurutma gibi popüler kurutulmuş ürünler arasında yer alsa da, bildiğimiz kadarıyla elmalar değişken veya sabit hava debili PVT kullanan bir kurutucuda kurutulmamıştır. Baysan ve ark. [46], maksimum enerji verimliliğini önceliklendiren kesikli kurutma ve nem tabanlı kontrollü sıcaklık yöntemlerini uygulamıştır. Kurutulan ürün kalitesinde bir iyileşme olmasına rağmen, bu yöntemlerin hiçbiri maksimum enerji verimliliği açısından etkili olmamıştır. Laskar ve ark. [47], mikrodalga kurutucuda muzların kurutma verimliliğini matematiksel modelleme ve regresyon analizi kullanarak optimize etmiştir. Ancak, sadece dilim geometrisi ve hangi modelin uygun olduğu hakkında bilgi sağlamışlardır.

Fu vd. (2021) soğutma ortamı olarak MPCM (Mikrokapsüllü Faz Değişim Malzemesi) bulamacının kullanıldığı deneysel bir PVT sistemi tasarlamış ve kurmuşlardır. Geleneksel su soğutmalı PVT sistemi ve PCM katmanına sahip benzer bir sistemle karşılaştırmışlar. MPCM bulamacının akış hızlarının arttırılmasının, PV hücresinin sıcaklığını azaltabileceğini, termal ve elektriksel verimliliği iyileştirebileceğini gözlemlemişlerdir. Sistemin ortalama elektrik verimliliği ve maksimum termal verimliliği sırasıyla %0,8 ve %13,5 oranında arttığını gözlemlemişlerdir Şekil 3.1 [48].



Şekil 3.1. Mikrokapsüllü faz değişim malzemeli PVT sistem tasarımı

Menon vd. (2022) yaptıkları çalışmada fotovoltaik termal (PVT) sistemin elektrik ve termal performansını, su ve bakır oksit bazlı nanoakışkan kullanarak incelemişlerdir. PVT sisteminin su ve nanoakışkan soğutması, panel sıcaklığını öğle saatlerinde sırasıyla 15°C ve 23.7°C düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Soğutmasız PVT sistemi ile karşılaştırıldığında, su ve nanoakışkan soğutmalı PVT sisteminin ortalama elektrik verimliliği sırasıyla %14.58 ve %17.61 ve termal verimliliği ise sırasıyla %58.77 ve %71.17 arttığı gözlemlenmiştir Şekil 3.2 [49].



Şekil 3.2. Nano akışkanlı PVT sistem tasarımı

Bu tez çalışmasında, PVT güneş kolektörü arka yüzeyine yapılan yeni bir ısı emici plaka ile beraber değişken debili yeni bir hava akış yapısı ile sabit debili hava akış yapısı ve bu durumun kurutma sistem üzerine etkisinin analiz edilebileceği bir tasarım sunulmuştur. Böylelikle değişken hava debisi yapısı PV yüzeyinden gelen sıcaklık değerlerine göre kontrol edilerek elekteriksel verimin artması ve elde edilen atık ısıyla elma dilimlerinin kurutulması amacına yönelik bir tasarım sunulmuştur. Buna göre, bu deneysel çalışmanın amaçları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Yeni bir PVT tasarlamak ve test etmek,
- İki farklı PVT kurutucunun kurutma kinetiğini araştırmak için sabit ve değişken hava debili PVT'nin enerji ve kurutma performansı üzerindeki etkisini analiz etmek,
- Yeni bir PVT ve algoritma kullanarak elmaların kuruma süresini ve kuruma kinetiğini belirlemek,
- Ürün kalitesinden ödün vermeden kurutma süresini azaltmak için.

Bu tasarımın kurutma sektörüne, ürün kalitesinden ödün vermeden, sıcaklığa bağlı olarak değişken hava debisi ile ürünlerin kurutulmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

4. TEORİK ANALİZ

PVT sistemlerinin tasarımında, sistemin genel performansı hem PV (η_{PV}) hem de termal (η_{th}) bileşenlerin verimliliği hesaplanarak değerlendirilir. Buna göre, bu iki verimin toplamı PVT sisteminin toplam verimini (η_{PVT}) verir [50].

$$\eta_{PVT} = \eta_{PV} + \eta_{th} \tag{4.1}$$

PV panelin verimliliği, panelin çıkış gücünün ($P_{PVçıkış}$) giriş gücüne ($P_{PVgiriş}$) oranı ile bulunur. Bu verimlilik, PVT sisteminin elektrik üretme kapasitesini değerlendirir. PV panelin verimliliği aşağıdaki şekilde hesaplanır [51].

$$\eta_{PV} = \frac{P_{PV_{çıkış}}}{S_{irr} \times A_{PV}} \times 100 \tag{4.2}$$

Termal verimlilik, PVT sisteminin termal bileşenlerinin gelen güneş enerjisini ne kadar etkili kullandığını gösterir. Termal verimlilik aşağıda verilmiştir [52].

$$\eta_{TH} = \frac{\dot{Q}_{th}}{S_{irr} \times A_{PV}} \tag{4.3}$$

Burada $\dot{Q}_{th}$ toplanan termal enerji gücü, S_{irr} PV yüzeyine gelen güneş ışınımı ve A_{PV} PV kolektörünün yüzey alanıdır. PVT sisteminin termal gücü Eşitlik 4.4 ile hesaplanır. Özgül ısı kapasitesi, sistemdeki akışkanın belirli bir sıcaklık artışı başına ne kadar enerji taşıyabileceğini belirler. Bu, termal tasarımın kritik bir bileşenidir ve Eşitlik 4.5 ile hesaplanır [52, 53].

$$\dot{Q}_{th} = \dot{m} \times c \times \left(T_{çıkış} - T_{giriş}\right) \tag{4.4}$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_{th}}{c \times \left(T_{çıkış} - T_{giriş}\right)} \tag{4.5}$$

Burada, "m"˙ akışkanın kütlesini, $T_{çıkış}$ ve $T_{giriş}$ sırasıyla PVT sistemleri giriş ve çıkış hava sıcaklıklarını, c ise sabit basınç altında havanın özgül ısı kapasitesini temsil etmektedir.

Sistemdeki hava yoğunluğunun belirlenmesi akışkan dinamiğinin anlaşılması için gereklidir. PVT sistemine giren havanın yoğunluğu Eşitlik 4.6 ile hesaplanır. Bu denklem, belirli bir sıcaklık ve basınç altında akışkanın hava yoğunluğunu hesaplar [54].

$$\rho_{hava} = \frac{P_{hava}}{R \times (T_{giriş} + 273.15)} \tag{4.6}$$

Burada; P_{atm} atmosferik basınçtır ve çalışmada 101325 N/m^2 olarak kullanılmıştır ve R havanın gaz sabitidir ve çalışmada 287 J/kg K olarak kullanılmıştır. Kurutma deneylerinde ürünlerin yaş baza göre nem içeriğinin hesaplanması aşağıdaki denklem ile yapılmaktadır [55].

$$MC_{wb} = \frac{W_w - D_w}{W_w} \tag{4.7}$$

Burada, MC_{wb} ıslak esasa göre nem içeriğini, W_w ve D_w sırasıyla ürünün ıslak ağırlığını ve kuru ağırlığını temsil eder. Buharlaşan su kütlesi aşağıdaki denklem ile hesaplanır [56].

$$m_{su} = W_w - D_w \tag{4.8}$$

Nem oranı (MR), maddedeki tam olmayan nem değişimini ifade eder. Kurutma deneyleri sırasında aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır [57].

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \tag{4.9}$$

Burada sırasıyla M nem içeriği, M_e denge nem içeriği ve M_o başlangıç nem içeriğidir. Kurutma hızı (DR), birim zaman aralığı başına ürünün nem içeriğindeki değişimdir. Kurutma işlemlerinde değişen kurutma hızları dikkate alınarak hesaplanır. Kurutma deneylerinde ürünlerin kuruma hızı aşağıdaki denklemler kullanılarak tahmin edilebilir [58].

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{d_t} \tag{4.10}$$

Burada M_{t+dt} sırasıyla "t+dt" zamanındaki nem içeriği, M_t ise "t" zamanındaki nem içeriğidir. Kurutma verimliliği aşağıdaki denklemle hesaplanır.

$$\eta_{kurutma}=\left(\dot{m}_b x h_{fg}\right)/\dot{Q}_{TH} \quad (4.11)$$

Burada $\eta_{kurutma}$ kurutma verimliliği, m_b yük hücresinden ölçülen kütle akış hızı, h_{fg} sırasıyla buharlaşmanın gizli ısısıdır. Buharlaşmanın gizli ısısı (h_{fg}), geliştirilen bir denklem ile doygunluk koşulunda hesaplanabilir. Mutlak sıcaklığın fonksiyonu olarak hfg için iki denklem kullanılır [59].

$$h_{fg}=2.503x10^{6}-2.386x10^{3}(T_{da}-273.16) \text{ eğer; } 273.16\leq T_{da}(K)\leq 338.72 \quad (4.12)$$

$$h_{fg}=(7.33x10^{12}-1.60x10^{7}T_{da}{}^{2})^{0.5} \quad \text{eğer; } 338.73\leq T_{da}(K)\leq 533.16 \quad (4.13)$$

T_o akış tipini analiz etmek için Reynolds sayısı aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir [60].

$$Re = \frac{V L}{v} \quad (4.14)$$

Bu denklemde V ürüne üflenen havanın ortalama hızını, L dairesel kurutma odasının iç çapına eşit karakteristik boyutu ve (ν) kinematik viskoziteyi temsil etmektedir. Schmidt sayısı (Sc) momentum difüzivitesinin kütle difüzivitesine oranına göre belirlenir. Sherwood sayısı (Sh), kütle transfer direncinin difüziviteye oranına göre tanımlanır. Konvektif kütle aktarım katsayısı (hm), Sh ve *Sc* arasındaki ilişki [60].

$$Sc= \frac{v}{D_{AB}} \quad (4.15)$$

$$Sh= 0.037\left(Re^{0.8}\right)Sc^{1/3} \quad (4.16)$$

$$h_m=\frac{Sh\, D_{AB}}{L} \quad (4.17)$$

Burada D_{AB} termal difüzyon katsayısıdır. Nemli havadaki kısmi su buharı basıncı (P_b) aşağıdaki denklemle hesaplanır [61].

$$P_b=P_{d,b}\phi \quad (4.18)$$

Buharın kütle transfer hızı aşağıdaki denklem ile hesaplanır [62].

$$\dot{m}_{su} = \left(\frac{h_m}{RT}\right)(P_d - P_b) \tag{4.19}$$

Kuruma süresi aşağıdaki denklem ile hesaplanır [56].

$$t = \frac{m_{su}}{\dot{m}_{su}} \tag{4.20}$$

SMER değeri, üründen 1 kg suyun atılması için kullanılan enerji miktarını temsil eder. Kurutucu için toplam güç tüketimi, PV tarafından sağlanan enerji ile ilişkili olabilir. Spesifik nem ekstraksiyon oranı (SMER) aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir [63].

$$SMER = \frac{\dot{m}_{su}}{P_{PVgiriş}} \tag{4.21}$$

Kütle aktarım hızını belirlemek için Biot sayısı ile hesaplanabilen kütle aktarım katsayısı kullanılır [4].

$$Bi = \frac{h_m L}{D_e} \tag{4.22}$$

Biot sayısı boyutsuzdur ve yüzeyinde konveksiyonla ısıtılan veya soğutulan bir cismin sıcaklık geçmişini belirlemede iletim ve konveksiyonun göreceli öneminin doğrudan bir göstergesini veren bir kriter anlamına gelir. D_e etkin difüzivite katsayısıdır. İki boyutsuz sayı arasındaki diğer formülasyonda, Biot sayısını belirlemek için Dinçer sayısı (D_i) kullanılır [64].

$$Bi = \frac{24.85}{Di^{0.375}} \tag{4.23}$$

Kurutma havası hızının ürün kurutma katsayısı üzerindeki etkisini belirten D_i sayısı, kurutma işleminde uygulanabilir [65].

$$Di = \frac{V}{k_c L} \tag{4.24}$$

Dinçer sayısı (Di), akışkan ortamın özelliği ile katı cismin ısıtma veya soğutma hızı arasındaki ilişkiyi ifade eder. Başka bir deyişle, akışkan özelliğinin düzenli veya düzensiz şekillere sahip katı nesnenin termal parametresi üzerindeki etkisini tanımlar. k_c kuruma sabitidir. Kuruma sabiti (k_c) aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir [65].

$$-k_c(M_t-M_e)=\frac{dx}{dt} \tag{4.25}$$

Belirsizlik analizinde, W_R sonucunun, x_i giriş verilerinin tek bir değer kümesinden hareketle $R=f(x_1, x_2,\ldots\ldots, x_n)$ fonksiyonu aracılığıyla hesaplanması durumunda, R'deki belirsizlik Holman tarafından Eşitlik 4.26'da ifade edilmiştir [66].

$$W_R=\left[\left(\frac{\delta R}{\partial x_1}w_1\right)^2+\left(\frac{\delta R}{\partial x_2}w_2\right)^2+\ldots+\left(\frac{\delta R}{\partial x_n}w_n\right)^2\right]^{1/2} \tag{4.26}$$

Bu bağlamda, $x_1,x_2,\ldots,x_n$ bağımsız değişkenler olarak tanımlanırken, W_R toplam belirsizliği, $w_1,w_2,\ldots,w_n$ ise her bir bağımsız değişkene ait belirsizlik değerlerini temsil etmektedir.

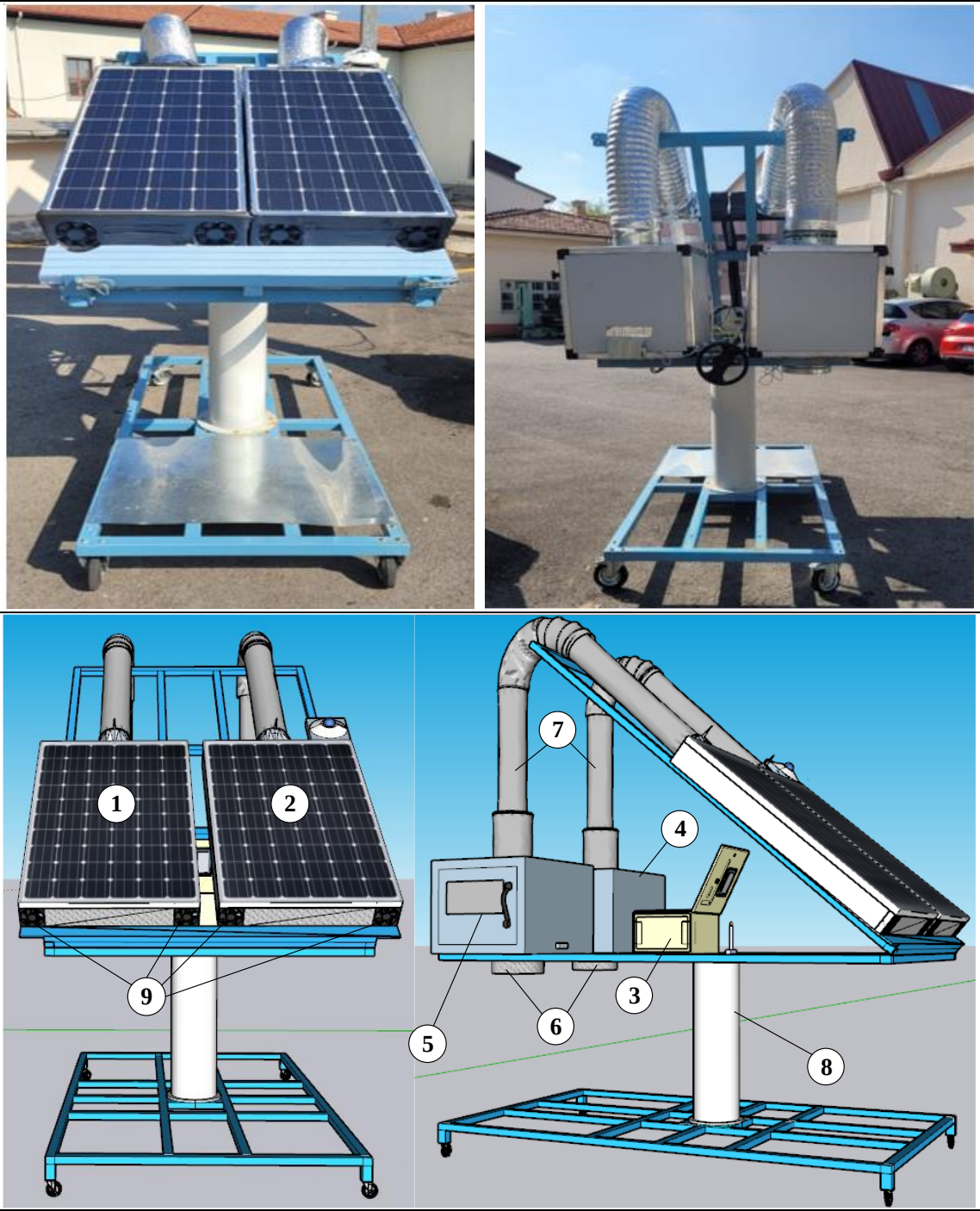
5. MATERYAL VE METOD

Bu bölümde, Bu tez çalışması ile sürdürülebilir, enerji verimli, çevre dostu yeni bir değişken hava debili PVT'li kurutma sistem tasarımı yapılarak enerji üretiminin arttırılması ve elde edilen termal enerji ile elma dilimlerinin gıda parametrelerine uygun bir şekilde kurutulması planlanmıştır. PVT panele entegre edilen yeni bir kanatçık yapısı ve PV yüzey sıcaklığına bağlı olarak fan hızının kontrolü ile bereber tüm sistem tasrımının aşamaları sunulacaktır. Bu tez çalışmasında PVT sistem tasarımı ve fan hızının PV yüzey sıcaklığına göre ayarlayan otomasyon sistemi tasarımı bu bölümde verilecektir.

5.1. Deneysel Sistemin Tasarımı ve Analizi

5.1.1. PVT tasarımı ve üretimi

Deney seti, sabit hava debili PVT kurutucu (CAVPVTD) ve değişken hava debili PVT kurutucu (VAVPVTD) içeren bir platform üzerine kurulmuştur. Şekil 5.1, VAVPVTD ve CAVPVT sistemlerinin fotoğrafını ve şemasını göstermektedir. Her iki PVT yapısı ve kurutma odası aynı özelliklerde imal edilmiştir. Deney düzeneğinde 2 adet 36 hücreli monokristal PV, 4 adet fan, aynı özelliklerde iki adet kurutma odası, bir otomasyon paneli ve bir platformdan oluşmaktadır. Kullanılan ekipmanlar Şekil 5.1'de verilmiştir. PVTD sistemlerinde kullanılan ekipman ve ölçüm cihazlarının özellikleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.



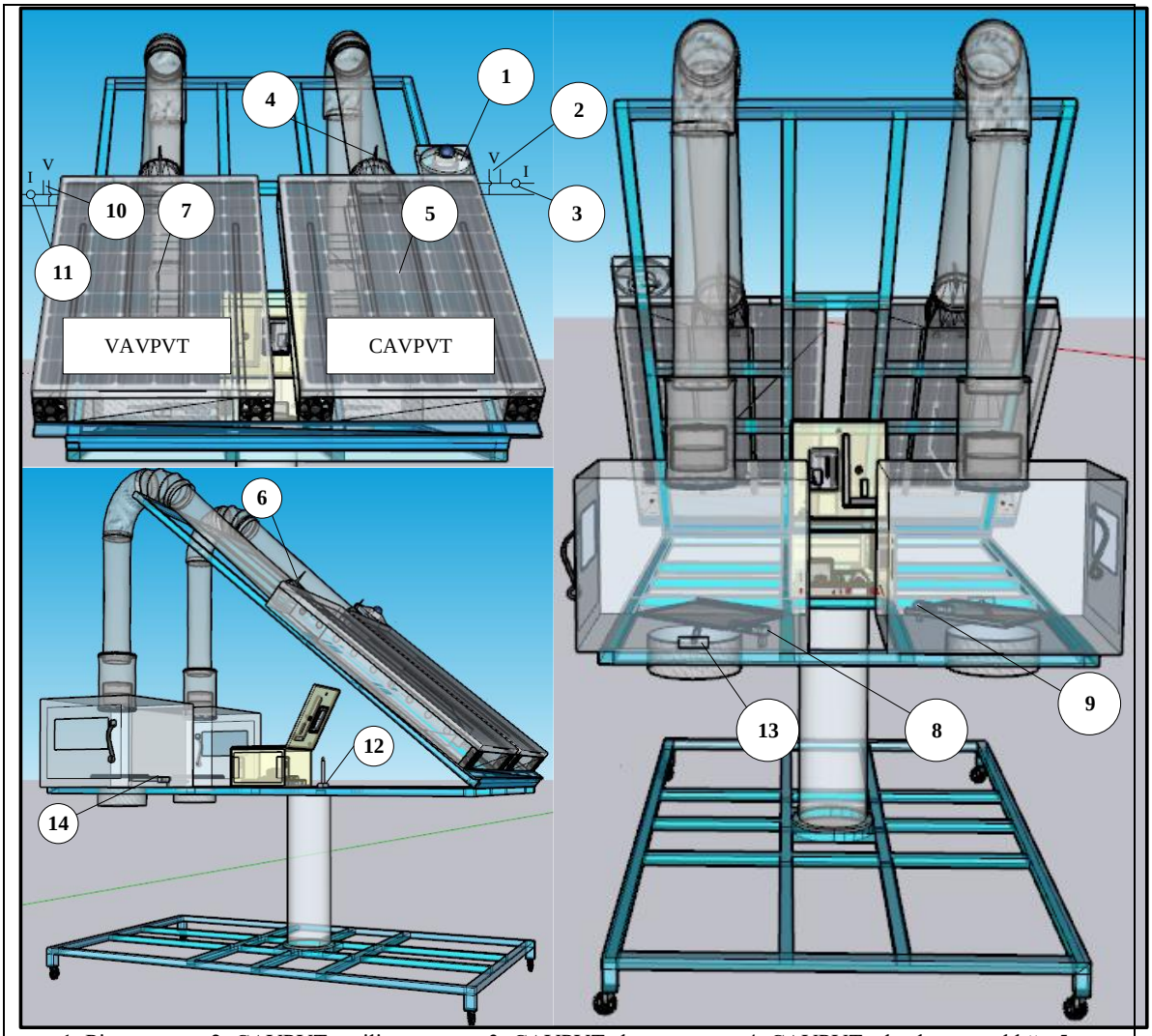
1: VAVPVT, 2: CAVPVT, 3: Otomasyon paneli, 4: Kurutma odası (CAVPVTD), 5: Kurutma odası (VAVPVTD), 6: Kurutma odası çıkış havası, 7: PVT çıkış havası/kurutma odası giriş havası, 8: Platform, 9: Fanlar.

Şekil 5.1. VAVPVTD ve CAVPVTD sistemlerinin şematik gösterimi.

Çizelge 5.1. PVTD sistemlerinde kullanılan ekipman ve ölçüm cihazlarının özellikleri.

Ekipman	Özellikler	Hassasiyet
PV (Fotovoltaik)	Monokristal, 36 hücre, Güç: 100 W, yüzey alanı: 0.65 m^2 × 2=1.3 m^2	±3%
Plakalar	Aluminyum, alan: 0.51 m^2, Deliksiz plaka boyutları: 800 x 150 mm, Delikli plaka boyutları: 900 x 150 mm, kalınlık: 0.5 mm	--
Yalıtımlı PVT Arka Yüzey Tabakası	Alüminyum levha ve yalıtım malzemesi, Alan: 0,65 m^2×2=1,3 m^2, Yalıtım malzemesi kalınlığı: 20 mm,	--
Soğutucu Fanlar	Gerilim: 12 V, Akım: 0,32 A, Boyutlar: 12×12×3,8 cm, Hız seviyeleri: 0,88–1,63 m/s	--
Piranometre	Ölçüm aralığı: 0-2000 W/m², Hassasiyet: 5 – 20 µV/W/m², Doğrusal olmayan: (0 – 1000 W/m²): < 1%	< ±5 W/m²
Sıcaklık Sensörü	NTC tipi, direnç değeri: 10 KΩ ±1% at 25 °C, çalışma sıcaklık aralığı: -30 ~ +105 °C	±0.1 °C
Hız ve Sıcaklık Ölçer	NTC sensör, sıcaklık aralığı: -20 ~ +70 °C, Hız: 0 – 20 m/s	±0.01 m/s, ±0.1 °C
Termohigrometre	Sıcaklık aralığı: -20 ~ +55 °C, bağıl nem: 0 to 100%	T: ±0.4 °C, Rh: ±2%
Yük Hücresi (Loadcell)	Kapasitesi: 10 kg, maksimum platform boyutu: 250 x 350 mm, Gerilim: 5 ~ 12V, Giriş direnci: 406 Ω ± 6, Çıkış direnci: 350 Ω ± 3, Çalışma sıcaklığı: −35 ~ + 65 °C	≤± 0.015
Yük Hücresi Sensör Sinyal Amplifikatörü	Besleme gerilimi: 24V, Sinyal girişi: 1mV/V, Çıkış sinyali: 0-5V / 0-10V / 4-20mA	--
Hassas Terazi	Kapasite: 0 – 6100 g, Çalışma sıcaklık ve nem değeri: 15 − 30 °C and 10–85% Rh	±0.01 g

Şekil 5.2'de imalatı yapılan deney düzeneğindeki ölçüm noktaları gösterilmektedir. Deney düzeneğinde kullanılan sensörler; güneş ışınımı, sıcaklık, bağıl nem, ağırlık, akım ve gerilim gibi değerleri ölçmek için Şekil 5.2'de gösterildiği gibi deney düzeneğine yerleştirilmiştir.

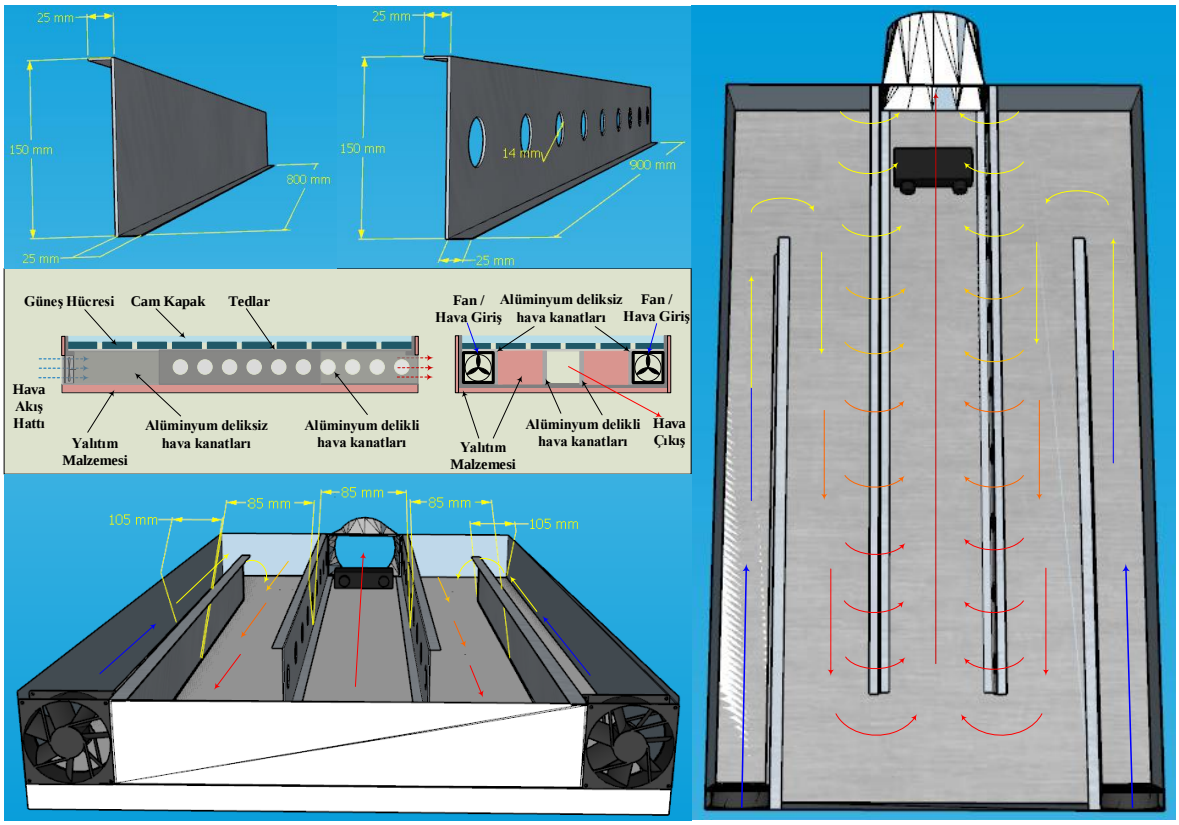


1: Piranometre, 2: CAVPVT gerilim sensörü, 3: CAVPVT akım sensörü, 4: CAVPVT çıkış hava sıcaklığı, 5: CAVPVT yüzey sıcaklığı, 6: VAVPVT çıkış hava sıcaklığı, 7: VAVPVT yüzey sıcaklığı, 8: Yük hücresi sensörü (CAVPVT), 9: Yük hücresi sensörü (VAVPVT), 10: VAVPVT gerilim sensörü, 11: VAVPVT akım sensörü, 12: Ortam hava sıcaklığı ve bağıl nem sensörü, 13: Kurutma odası çıkış hava sıcaklığı ve bağıl nem sensörü (CAVPVT), 14: Kurutma odası çıkış hava sıcaklığı ve bağıl nem sensörü (VAVPVT).

Şekil 5.2. Ölçüm noktalarının gösterimi.

Şekil 5.3'te kapsamlı PVT çizimleri gösterilmektedir. Her iki PVT'de iki fan kullanılmış ve PVT'nin hava emiş noktasında sağ ve sol taraflara monte edilmiştir. CAVPVTD'deki fanlar belirlenen değerlerde sabit çalışacak şekilde ayarlanırken, VAVPVTD'deki fanlar PVT'nin yüzey sıcaklığına göre değişken debilerde çalışacak şekilde düzenlenmiştir. PVT tasarımının arka yüzeyi 20 mm kalınlığında yalıtım malzemesi ile sızdırmaz hale getirilerek ısı emici plakalar arasında hava sızdırmazlığı sağlanmıştır. PVT'lerin her ikisininde arka tarafı kapalıdır. Her iki PVT'nin arka kısmı ise beş bölmeden oluşan ve hava yolunu uzatan bir labirent yapısına sahip olacak şekilde imal edilmiştir. Bölmeleri oluşturan alüminyum levhalardan ikisi delikli, ikisi ise düz levha olarak tasarlanmıştır. Delikli levhalar PVT'nin

ortasında yer alırken, düz levhalar PVT'nin kenarlarına yakın yerleştirilmiştir. Böylece fanlar yardımıyla PVT'nin arkasına hava basıldığında, hava düz levha ve kasa boyunca PVT'nin üst bölgesine doğru hareket eder, daha sonra döner ve havanın bir kısmı fanların olduğu bölgeye doğru hareket eder, daha sonra PVT'nin üst bölgesine doğru hareket ederek, deliklerden geçen hava ile birleşir ve PVT'yi terk eder.



Şekil 5.3. PVT'lerin hava yolu ve kanat yapısının ayrıntılı çizimleri.

5.1.2. Kontrol algoritması

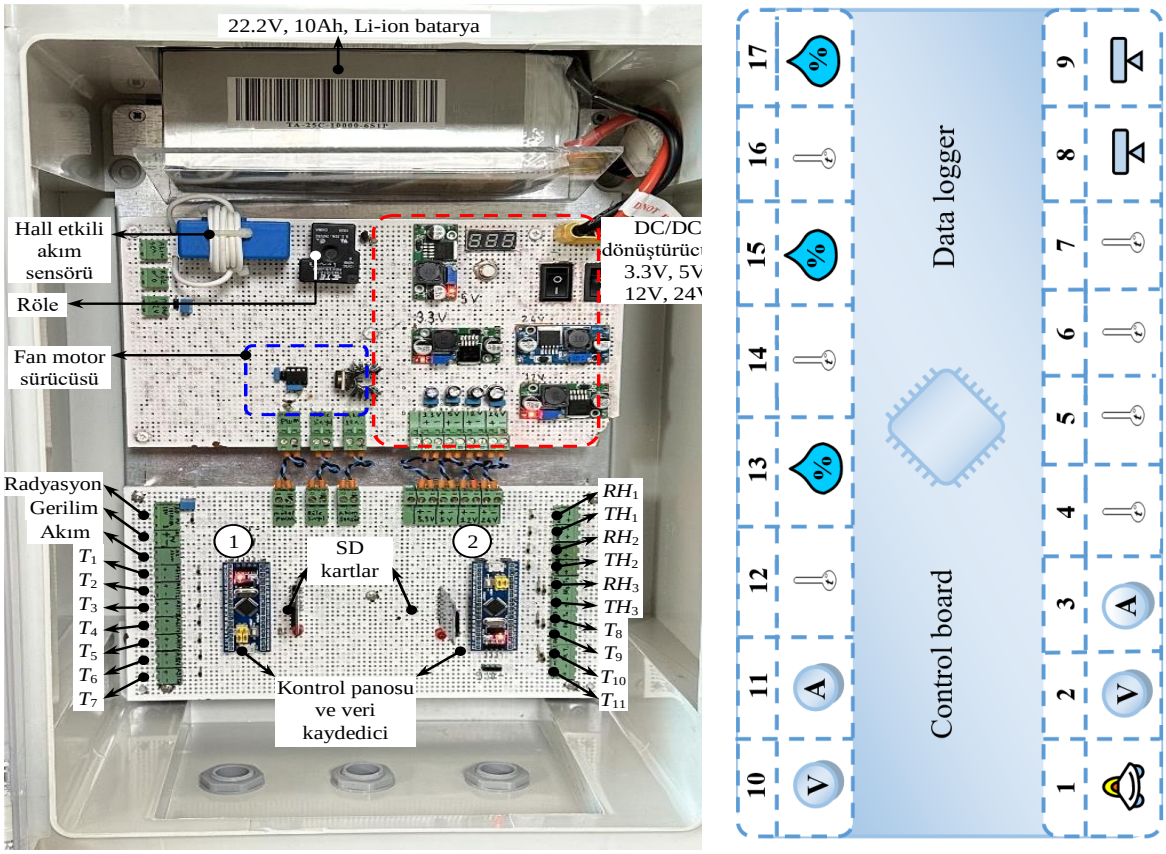
Kontrol ve veri kaydedici kartlar, 12 bit ADC çözünürlüğüne sahiptir ve çift STM32F103C8T6 işlemcileri tarafından desteklenmektedir. Bu kartlar, 20 farklı sensör parametresinin ölçümüne olanak tanımaktadır. Şekil 5.4, PVT sistemlerindeki kontrol kartı ve veri kaydedici devrelerinin topolojisini göstermektedir. Veri kaydedici, güneş ışınımı (Kipp&Zonen marka SMP22 piranometre ile), akım (LEM marka LA 200-P hall-etki sensörü ile) ve sıcaklık (negatif sıcaklık katsayılı (NTC) sensörler ve termokupllarla) gibi verileri toplarken, kontrol kartı bu verileri görüntülemektedir. Ortamın bağıl nemi, Notion Control markasına ait nem ve sıcaklık sensörleri ile ölçülmüştür. Kontrol kartı, ölçülen

verileri her dakika bir güvenli dijital (SD) karta kaydetmektedir. Şekil 5.5, CAVPVT sistemi için önerilen kontrol algoritmasının akış şemasını göstermektedir.

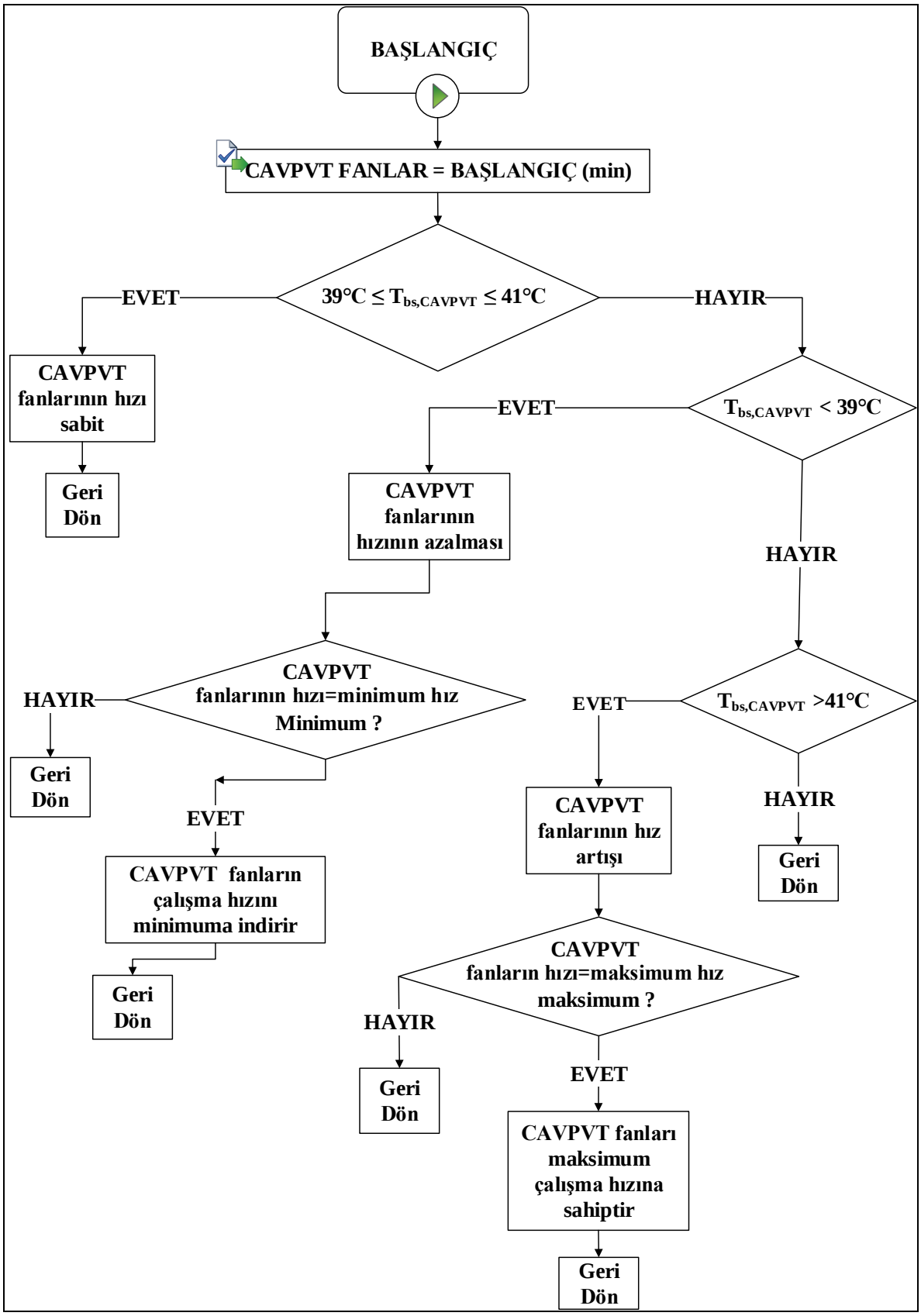
Her iki sistem de iki gün boyunca (1.Gün ve 2.Gün) sabit debide çalıştırılmasına rağmen, kurutma sırasında elmaların kalitesini korumak için kurutma havası sıcaklığının 40 °C'nin üzerine çıkmamasını garanti eden bir algoritma geliştirilmiştir. Ancak bu çalışmada algoritma PV yüzey sıcaklığını belirli bir seviyede tutmaya odaklanmıştır. Algoritmanın temel amacı, PV sıcaklığını belirlenen değerde tutmaya çalışarak PV verimliliğini maksimum değerde tutmaktır. Böylece PV yüzey sıcaklığına bağlı olarak kurutma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan kontrol panosu ve veri kaydedici ile Çizelge 5.2'deki ölçüm noktalarından veriler toplanmıştır.

Çizelge 5.2. Sistemlerdeki ölçüm noktaları.

Ölçüm noktası	Ölçüm sembolü	Açıklama
1	S_{irr}	Güneş ışınımı
2	v_{CAVPVT}	CAVPVT gerilimı
3	i_{CAVPVT}	CAVPVT akımı
4	$T_{ao,CAVPVT}$	CAVPVT hava çıkış sıcaklığı
5	$T_{bs,CAVPVT}$	CAVPVT arka yüzey sıcaklığı
6	$T_{ao,VAVPVT}$	VAVPVT hava çıkış sıcaklığı
7	$T_{bs,VAVPVT}$	VAVPVT arka yüzey sıcaklığı
8	LC_{CAVPVT}	CAVPVT yük hücresi (malzeme kütlesi ölçümü)
9	LC_{VAVPVT}	VAVPVT yük hücresi (malzeme kütlesi ölçümü)
10	v_{VAVPVT}	VAVPVT gerilimi
11	i_{VAVPVT}	VAVPVT akımı
12	T_{aa}	Ortam hava sıcaklığı
13	RH_{aa}	Ortam havası bağıl nemi
14	$T_{co,VAVPVT}$	VAVPVT kabin çıkış havası sıcaklığı
15	$RH_{co,VAVPVT}$	VAVPVT kabin çıkış havası bağıl nemi
16	$T_{co,CAVPVT}$	CAVPVT kabin çıkış havası sıcaklığı
17	$RH_{co,CAVPVT}$	CAVPVT kabin çıkış havası bağıl nemi



Şekil 5.4. PVT sistemlerindeki kontrol kartı ve veri kaydedici devreleri.



Şekil 5.5. CAVPVT sistemi kontrol algoritmasının akış şeması.

5.1.3. Elmaların hazırlanması

Kurutma sistemlerinde önemli kriterlerden biri olan ürün kalitesi, kimyasal bozulma, renk değişimleri, kurutma sırasında kirlenme ve kontaminasyon olmaması, hızlı ve basit hidrasyon gibi parametrelerden etkilenmektedir. Havadaki oksijen dilimlenmiş elmaların kahverengileşmesine neden olur, yani enzimatik esmerleşme (bir oksidasyon reaksiyonu) meydana gelir.

Bunu önlemek için ısı ve asitler kullanılır ki bu çalışmada da ısı kullanılmıştır. Bu çalışmada ürünler herhangi bir ön işleme tabi tutulmadan kahverengiye dönmeleri sağlanarak doğal yollarla kurutulmuştur. Yerel bir marketten satın alınan elmalar yıkandı, kurutuldu, dilimlendi ve raflara yerleştirildi. Her denemede 250 g ±0,5 g ağırlığında ve 4 mm ±0,25 mm kalınlığında dilimlenmiş taze elmalar kullanılmıştır.

5.1.4. Deneysel prosedür

Kurutma hızını etkileyen faktörler; kurutma havası sıcaklığı, bağıl nem, kurutulacak ürünün özellikleri, ürün yığını kalınlığı, ısı transfer yöntemi, kurutma odasının geometrisi ve ürün hareketliliğidir [3]. Kurutma uygulamalarında, kurutma havasının hızı önemli bir parameter olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun yanısıra kurutma uygulamalarında kurutma sıcaklığı kadar kurutma havası hızı da önemlidir. Kurutma havası hızı kurutulacak ürüne göre ayarlanmazsa kuruma süresi değişirken deformasyonlar da meydana gelebilir.

Bu tez çalışmasında testler dört gün boyunca gerçekleştirilmiştir. Deneysel prosedür Çizelge 5.3'te verilmiştir. Testler birinci ve ikinci gün sabit hava hızlarında gerçekleştirilmiştir. Sistemlerden biri düşük sabit hava hızında çalıştırılırken diğeri daha yüksek sabit hava hızında çalıştırılmıştır. Üçüncü ve dördüncü günlerde, sistemlerden biri sabit hava hızında çalıştırılırken, diğeri PV yüzey sıcaklığına bağlı olarak değişken hava debisinde çalıştırılmıştır.

Çizelge 5.3. Deneysel prosedür.

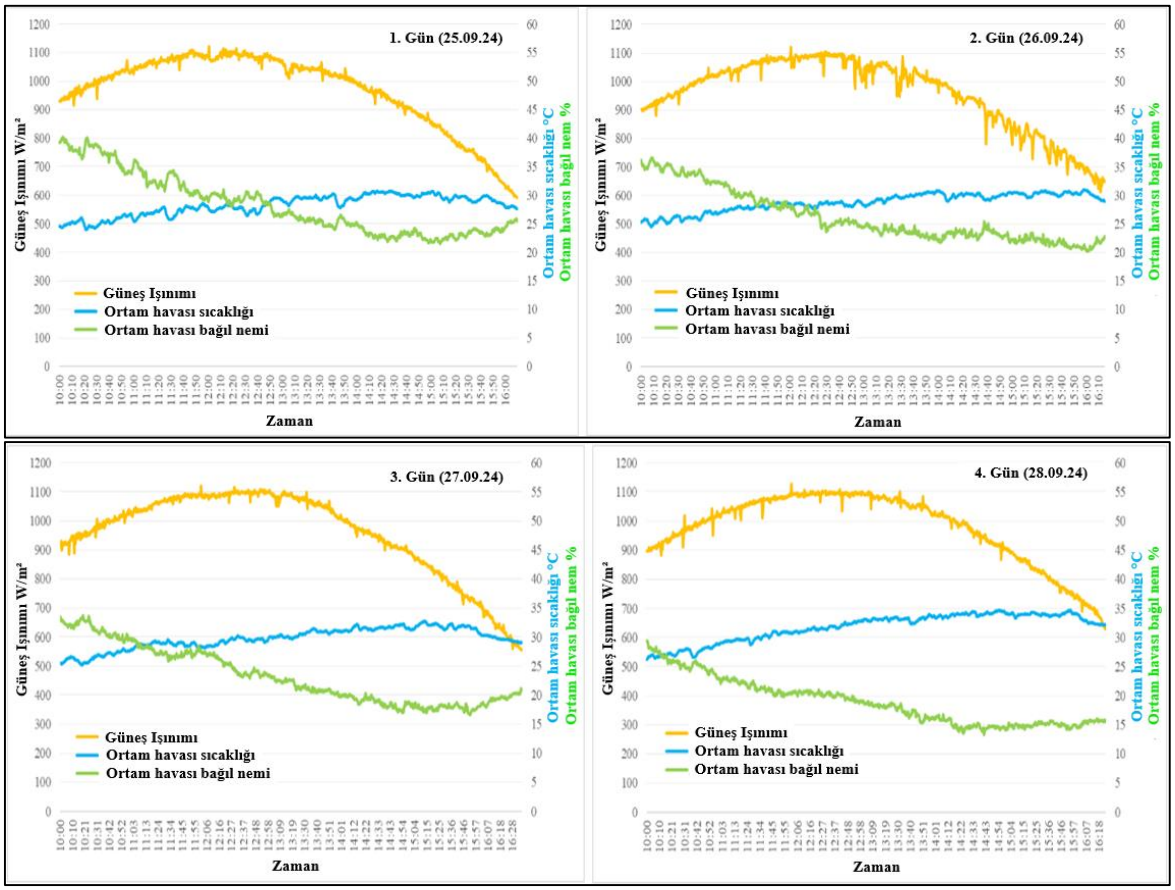
Deney günleri	Sistem-1 (CAVPVTD) Hava hızı (m/s)	Sistem-2 (VAVPVTD) Hava hızı (m/s)	Dış Ortam Koşulları (Ortalama)	Açıklama
1. Gün	1.18	1.63	968.35 W/m^2, 28.19 °C	Her iki sistem de sabit hava debisindedir.
2. Gün	1.18	1.63	956.96 W/m^2, 28.77 °C	Her iki sistem de sabit hava debisindedir.
3. Gün	1.18	Değişken hava debisi	957.05 W/m^2, 29.73 °C	Sistemlerden biri sabit bir hava debisi oranına sahipken, diğerinin debi oranı 40 °C PV yüzey sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir.
4. Gün	1.18	Değişken hava debisi	976.56 W/m^2, 31.76 °C	Sistemlerden biri sabit bir hava debisi oranına sahipken, diğerinin debi oranı 40 °C PV yüzey sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Üçüncü günle karşılaştırıldığında, dış sıcaklık daha yüksektir.

6. DENEY SONUÇLARI

Bu çalışma, dört gün süresince yapılan elma dilimi kurutma testlerini içermektedir. Birinci ve ikinci günlerde, sabit hava debisinde testler yapılırken, üçüncü ve dördüncü günlerde sistemlerden biri sabit hava hızı ile diğeri ise PV yüzeyinin sıcaklığına bağlı olarak değişen hava debisiyle çalıştırılmıştır. Bu şekilde, hava hızı ve sıcaklık etkileri dört farklı günde gözlemlenmiştir. Aşağıdaki bölümlerde bazı kısaltmalar kullanılmaktadır; bunlar, sabit hava debili PVT kurutucu (CAVPVTD), yüksek hava debili CAVPVTD (CAVPVTD-HAV) ve değişken hava debili PVT kurutucu (VAVPVTD) olarak tanımlanmaktadır.

6.1. Elektriksel ve Termal Analizler

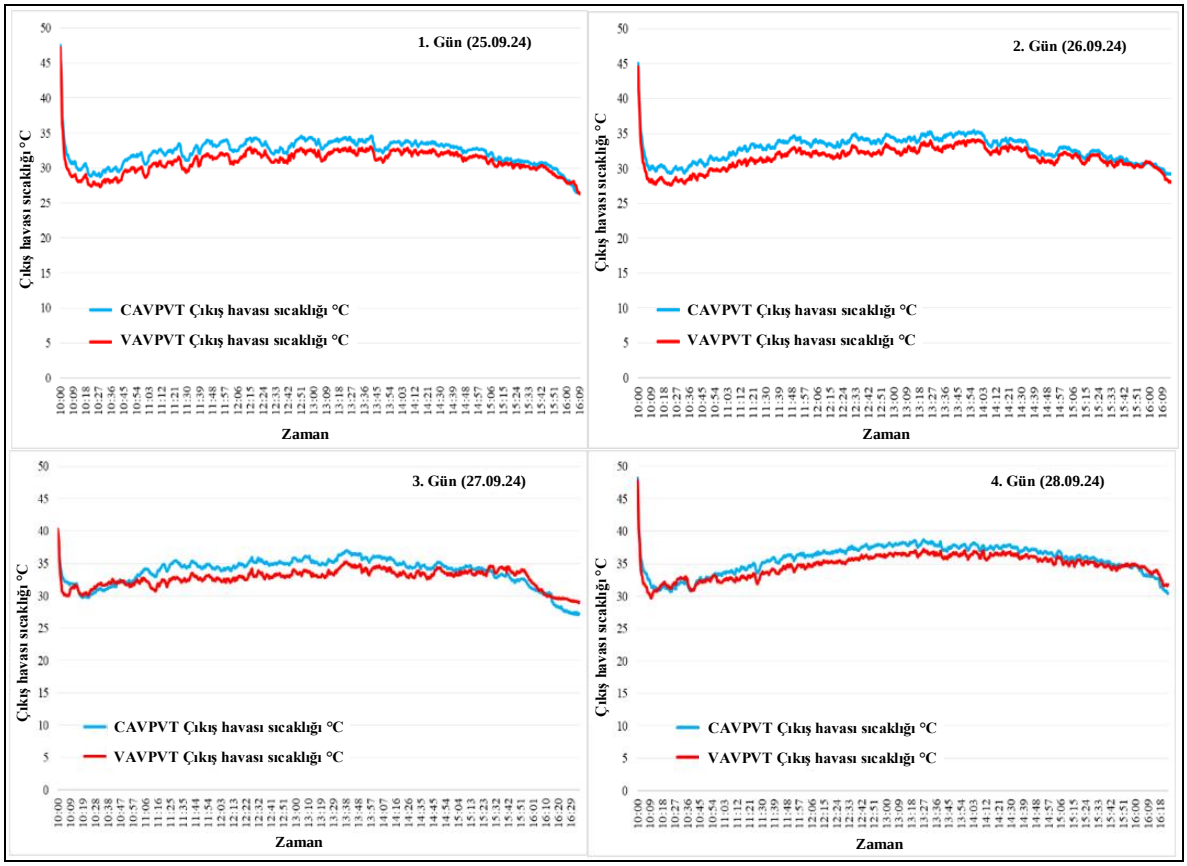
Bu tez çalışması kapsamında yapılan deneyler, farklı koşullar altında aynı özelliklere sahip iki sistemin elektrik ve termal performansını test etmek için birbirini izleyen dört gün boyunca (25-28 Eylül) gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında bağıl nem, ortam hava sıcaklığı ve güneş radyasyonu gibi çevresel faktörlerdeki değişimler Şekil 6.1'de gösterilmektedir. İkinci gün bulutlanma nedeniyle dalgalanmalar gözlense de güneş ışınımı değerleri tüm deneylerde benzer eğriler oluşturmuştur. Ortalama güneş ışınımı değerleri 1, 2, 3 ve 4. günlerde sırasıyla 968,35 W/m^2, 956,96 W/m^2, 957,05 W/m^2 ve 976,56 W/m^2 ölçülmüştür. Ortalama ortam hava sıcaklıkları her dört gün için sırasıyla 28,19 °C, 28,77 °C, 29,73 °C ve 31,76 °C olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.1. Testler sırasında çevresel parametreleri gösteren değerler.

Şekil 6.2'de CAVPVTD, CAVPVTD-HAV ve VAVPVTD sistemleri için çıkış hava sıcaklıklarının (ÇHS) anlık değişimini göstermektedir. Birinci ve ikinci günlerde, CAVPVTD ve CAVPVTD-HAV sistemlerinde ÇHS'lerin benzer eğriler izlediği gözlemlenmiştir. Çoğu denemede, güneş ışınımı nedeniyle ÇHS'lerde belirgin farklar gözlemlenirken, günün sonlarına doğru benzer değerler elde edilmiştir. Birinci günde, CAVPVTD'nin ortalama ÇHS'si, diğer sisteme göre %4,2 daha yüksek bulunmuştur. Bu fark, ikinci günde %4,06 olarak ölçülmüştür. Yüksek hava hızı sisteminde (CAVPVTD-HAV), ÇHS değerlerinin çoğunlukla diğerine göre daha düşük olduğu gözlemlenmiş, bu da kurutma işleminin düşük sıcaklıklarda yapıldığını göstermektedir. Buna göre, kurutma hızının düşük olduğu ve kurutma süresinin uzadığı söylenebilir. Üçüncü ve dördüncü günlerde, CAVPVTD ve VAVPVTD sistemlerinde ÇHS'lerin benzer eğriler izlediği gözlemlenmiş, ancak üçüncü günün sonundaki deneyde, CAVPVTD'nin ÇHS eğrisinin VAVPVTD'nin ÇHS eğrisini kestiği ve daha düşük sıcaklıklara ulaştığı belirlenmiştir. Üçüncü günde, CAVPVTD'nin ortalama ÇHS'si, diğerine göre %2,85 daha yüksek bulunmuştur. Bu fark, dördüncü günde %2,64 olarak ölçülmüştür. Üçüncü ve dördüncü

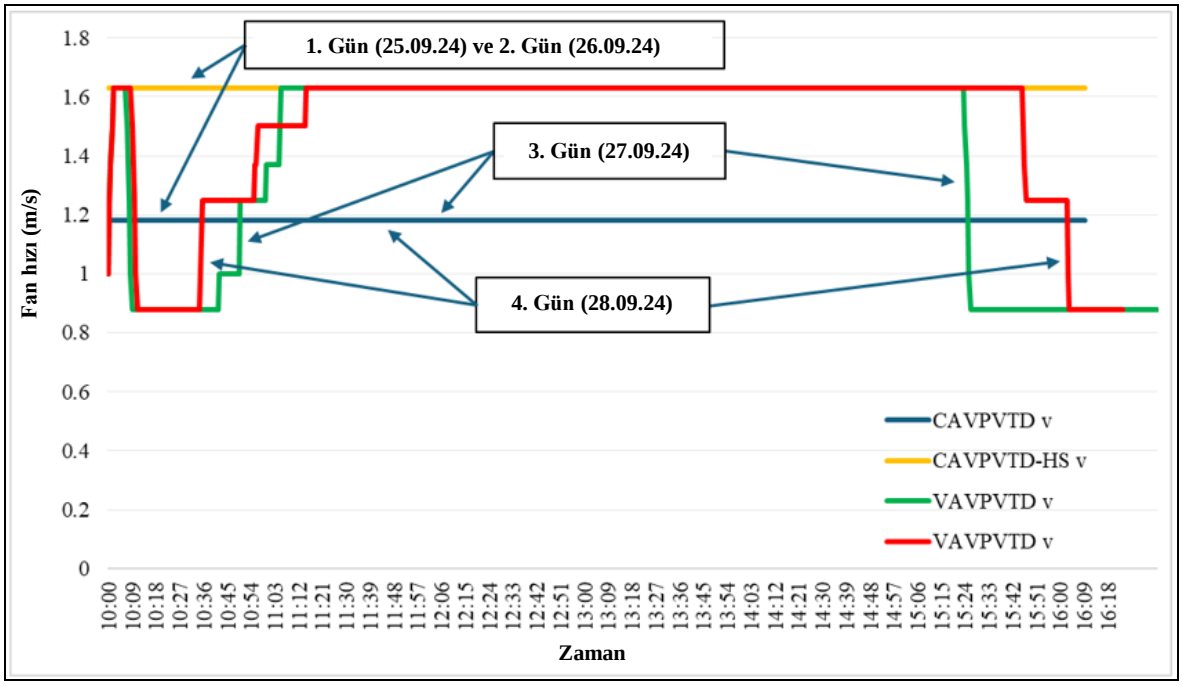
günlerde, CAVPVTD ve VAVPVTD sistemlerinde ÇHS'lerin benzer eğriler izlediği gözlemlenmiş, ancak üçüncü günün sonunda CAVPVTD'nin ÇHS eğrisinin, VAVPVTD'nin ÇHS eğrisini kestiği ve daha düşük sıcaklıklara ulaştığı belirlenmiştir. Bunun nedeni, CAVPVTD sistemindeki fan hızının gün boyunca sabit kalırken, VAVPVTD sisteminde fanın, PV yüzey sıcaklığının 40 °C olarak ayarlanmasına bağlı olarak günün sonlarına doğru hızını düşürmesi ve değişken hava debisi değerini azaltmasıdır. Bu da VAVPVTD'nin ÇHS değerlerini düşürmüştür. Bu durumda, kurutma hızını da olumlu yönde etkilemiştir.



Şekil 6.2. Çıkış havası sıcaklıklarındaki anlık değişim.

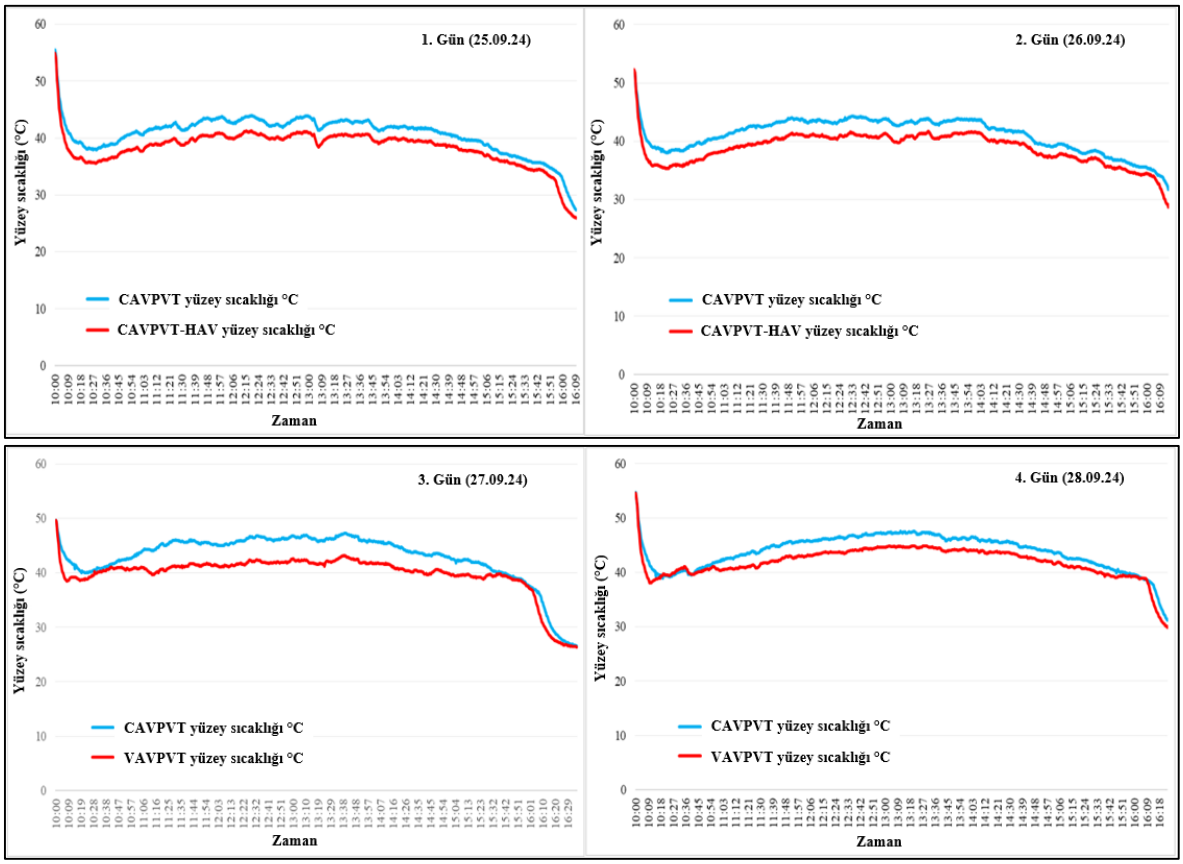
Şekil 6.3, hava hızının anlık değişimini göstermektedir. CAVPVTD'de giriş hava hızı sabitken, CAVPVTD-HAV'da hava hızı sabit ancak diğerine göre daha yüksektir. VAVPVTD'de ise giriş hava hızı değişkendir, hız kontrolü dış hava koşullarına ve dolayısıyla PV yüzey sıcaklığına bağlı olarak hazırlanan algoritma ile sağlanmıştır. Hazırlanan algoritma ile hız kontrolünün sağlandığı durumlarda deney başlangıcında biriken ısı enerjisini atmak için otomasyon sistemi fanları en yüksek hızda çalıştırmıştır. Bu da ürün nemi yüksek olan ürünün daha hızlı kurumasına neden olmuştur. Daha sonra PV yüzey

sıcaklığına bağlı olarak algoritma fanların hızını düşürdü ve bu durum bir süre devam etti. Daha sonra PV yüzey sıcaklığına bağlı olarak fanlar tekrar maksimum hıza çıktı ve uzun bir süre orada kaldı. Son olarak, deneyin sonuna doğru, güneş ışınımı azaldıkça fan hızının tekrar azaldığı görülmüştür. Deneyin sonunda fan hızının düşmesiyle birlikte kurutma hızı da önemli ölçüde artmıştır.



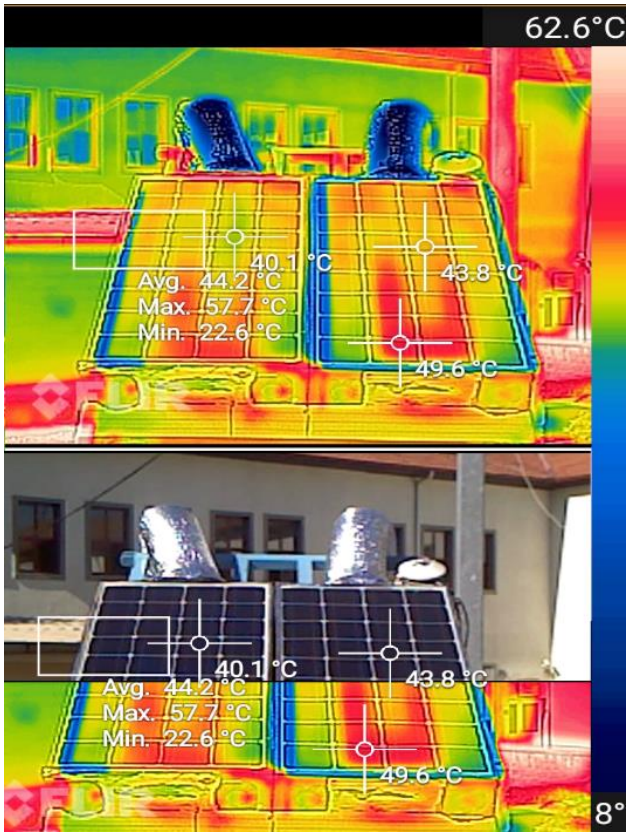
Şekil 6.3. Hava hızının anlık değişimi.

Şekil 6.4, PVT yüzey sıcaklıklarındaki anlık değişimi göstermektedir. Tüm deneylerde, CAVPVTD-HAV sistemindeki PVT yüzey sıcaklıkları, CAVPVTD sistemindeki PVT yüzey sıcaklıklarından her zaman daha düşük olmuştur. Birinci günde, CAVPVTD sistemindeki PVT'nin ortalama yüzey sıcaklığı, CAVPVTD-HAV sistemine göre %5,76 daha yüksek bulunmuştur. Bu fark, sırasıyla İkinci, Üçüncü ve Dördüncü günlerde %5,63, %7,15 ve %4,26 olarak ölçülmüştür. Bu durum, yüksek değişken hava debisi değeri nedeniyle iyi bir soğutma sağladığını göstermektedir. Elbette, bazen değişken hava debisi değerleri sabit hava debisi değerlerinden (İkinci ve Üçüncü günlerde) daha düşük olduğu zamanlar olmuştur, ancak yine de yüzey sıcaklıklarını daha düşük tutmayı başarmıştır. Böylece, daha yüksek bir elektriksel verimlilik elde edilmiştir.



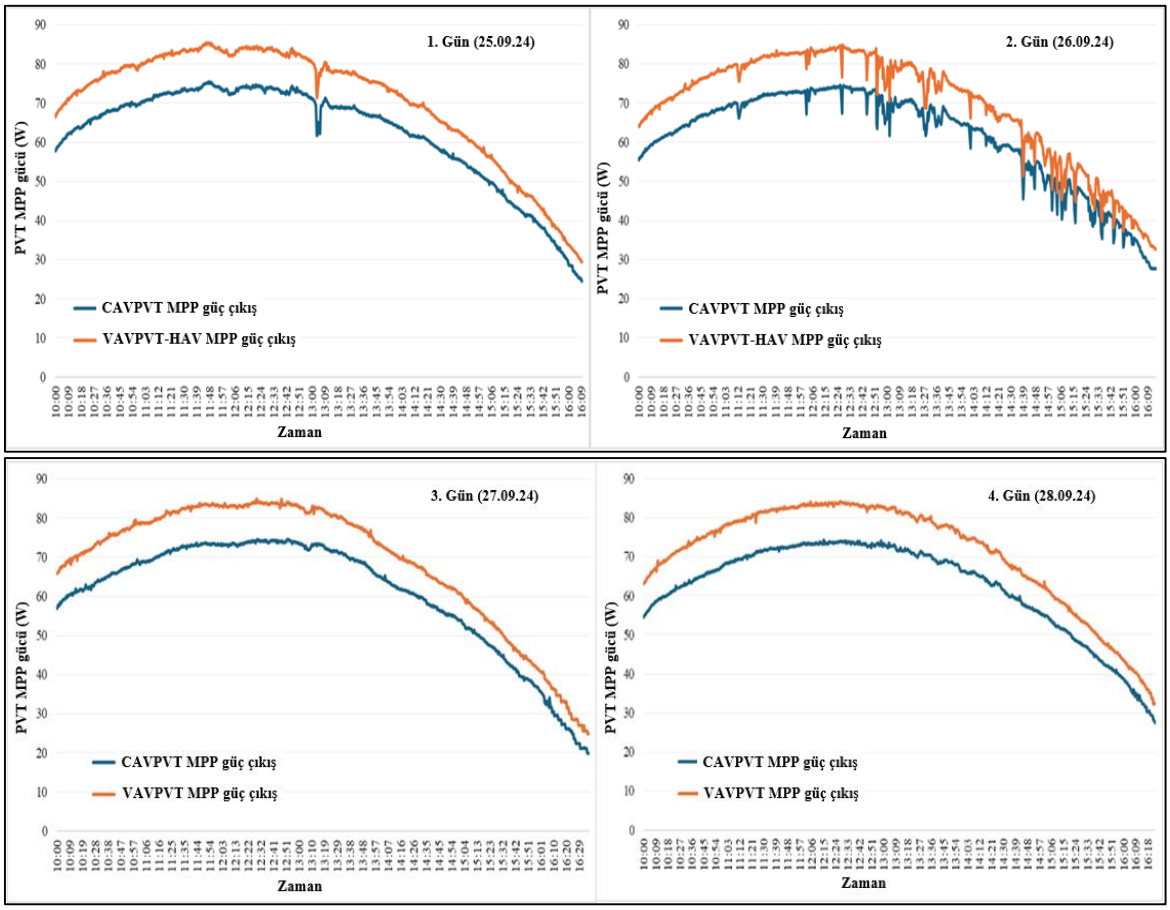
Şekil 6.4. PVT yüzey sıcaklıklarındaki anlık değişim.

Şekil 6.5'te termal kameranın dördüncü günde aldığı görüntüler gösterilmektedir. Sağdaki sabit hava debisi ile kullanıldığı anın, soldaki ise değişken hava debisi ile kullanıldığı anın termal görüntülerini göstermektedir. Fanların alanı nasıl soğuttuğu açıkça görülmektedir. Genelde PVT'lerin hava soğutma uygulamalarında en sıcak alanlar PVT'nin üst (hava çıkış) alanları olurken bu tasarımda PVT'nin büyük bir kısmının soğutulduğu ve alt (hava giriş) alanların daha sıcak olduğu gözlemlenmiştir. Bu tasarım iyi bir soğutma sağladığını gösterse de eşit soğutma sağlamadığı ve PVT yapısında hava yönü ve kanallarda sabit delik çapı yerine delik çaplarının kademeli olarak azaltılması gerektiği ortaya çıkmıştır.



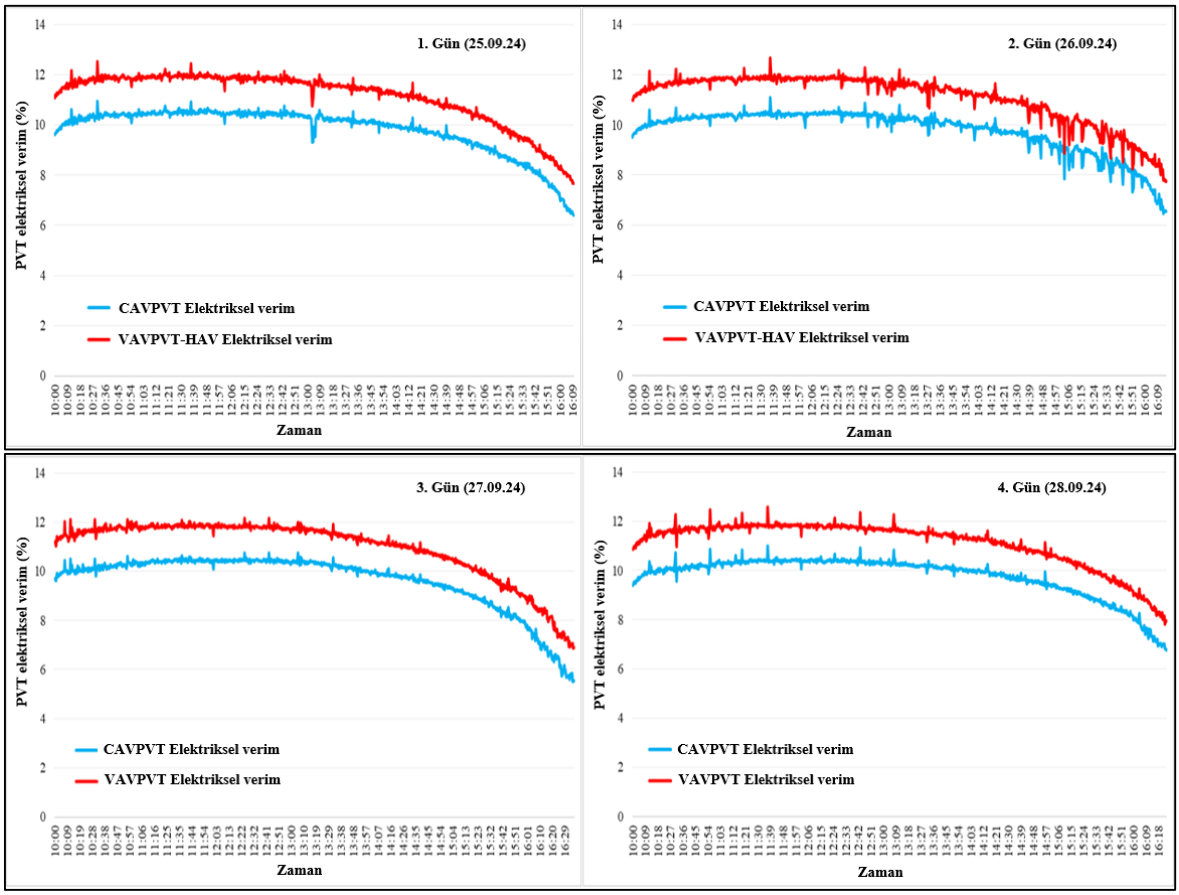
Şekil 6.5. 4. günde çekilen termal kamera görüntüleri.

Maksimum Güç Noktası (MPP), önerilen PVT'ler tarafından üretilen maksimum elektrik gücünün yüke aktarımını değerlendirmek için kullanılmaktadır. Güneş ışınımı, ortam sıcaklığı ve güneş hücresi sıcaklığı PVT'lerin MPP'sini etkileyen değişkenlerden sadece birkaçıdır. Şekil 6.6, deneylerde PVT'nin MPP'sindeki anlık güç değişimini göstermektedir. Genel olarak benzer eğriler gözlense de ikinci gün deneyinde güneş ışınımına bağlı olarak dalgalanmalar gözlenmiştir. En yüksek anlık PVT MPP'si 85,34 W olarak ilk gün ve CAVPVTD-HAV'da elde edilmiştir. Bu durum, CAVPVTD-HAV'daki daha yüksek hava hızı nedeniyle PVT'nin daha iyi soğutulduğunun bir göstergesidir.



Şekil 6.6. Deneylerde PVT'nin maksimum güç noktasındaki (MPP) anlık güç değişimi.

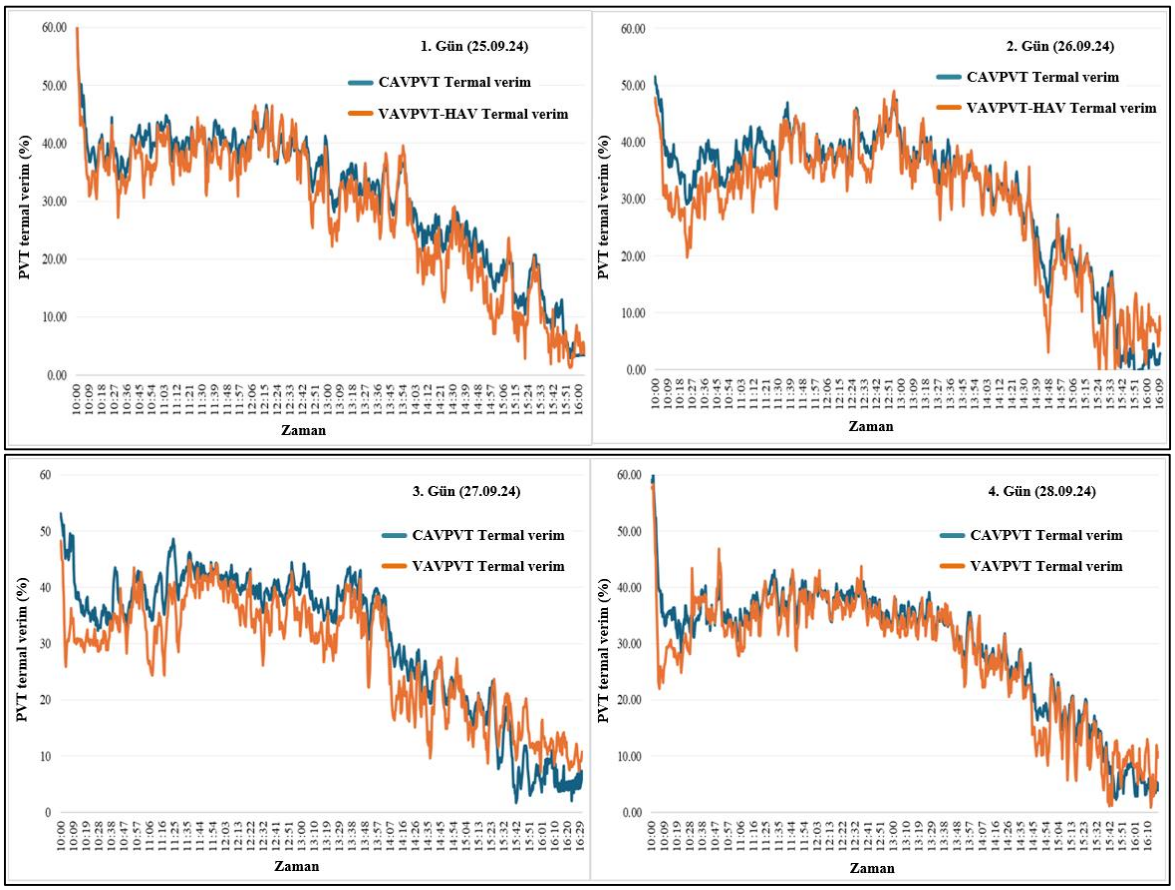
Şekil 6.7, bu çalışmada PVT'de yapılan testler sırasında anlık elektrik verimliliğinin nasıl değiştiğini göstermektedir. Maksimum elektriksel verim CAVPVTD-HAV'da ikinci gün %12,67 olarak elde edilmiş, ancak diğer günlerde elde edilen değerler de bu değere oldukça yakın olmuştur. Maksimum elektriksel verimlilik 1., 3. ve 4. günlerde sırasıyla %12,51, %11,96 ve %12,57 olarak bulunmuştur. Öte yandan, ortalama elektriksel verimlilikler karşılaştırıldığında, en yüksek değer CAVPVTD-HAV'da ilk gün %11,14 olmuştur. Bu değer 4, 2 ve 3. günlerde sırasıyla %11,11, %11,09 ve %10,95 olarak elde edilmiştir. Bu, %13,79'a kadar bir elektriksel verimlilik artışı anlamına gelmektedir [6] ve amorf silikon PV için bu oran %5,7 olarak bulunmuştur [67]. Kullanılan PV panelde, yöntem ve hava koşullarına bağlı olarak farklı sonuçlar elde edilmiştir. Camdan cama tip PV için benzer bulgular gözlemlenmiş olup, bu oran %12,44-14,06 arasında değişirken [26], monokristalin PV için ise %13,49 bulunmuştur. PVT üzerine yapılan çalışmalarda genel olarak PVT'nin elektriksel verimliliğine odaklanılmıştır [6, 67, 26].



Şekil 6.7. Deneylerde PVT'de anlık elektrik veriminin değişimi.

Şekil 6.8'de, bu çalışma kapsamında yapılan deneyler sırasında PVT'deki anlık termal verimlilik değişimini göstermektedir. VAV kontrolü, PVT'deki elektriksel verimliliğin önemli ölçüde artırmasına rağmen, termal verimliliğin CAVPVT'ye kıyasla daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Öte yandan, hava sıcaklığı arttıkça termal verimliliğin de arttığı, 4. gün'de gözlemlenmiştir. 1. gün, 2. gün ve 4. gün'deki ortalama termal verimlilikleri karşılaştırdığında, CAVPVT sırasıyla CAVPVT-HAV'dan %6,8, %5,61 ve %4,09 daha iyi performans göstermiştir. Ortalama termal verimlilikler karşılaştırıldığında, en yüksek değer 4. gün'de CAVPVT'de %32,28, en düşük değer ise aynı günde VAVPVT'de %28,67 olarak belirlenmiştir. Ortalama termal verimlilik, Arslan ve Aktaş [6] ve Kong et al. [67] tarafından sırasıyla %43,75 ve %46,8 olarak belirlenmişken, maksimum termal verimlilik Gupta et al. [26] tarafından %36,01 olarak bildirilmiştir. İlginç bir şekilde, Üçüncü Gün'de CAVPVT, CAVPVT-HAV'a kıyasla %26,34 oranında önemli bir performans üstünlüğü göstermiştir. Bunun, VAVPVT'nin deney süresinin üçte biri boyunca CAVPVT'den çok daha düşük hava debisinde çalışması ve geri kalan üçte ikisinde daha yüksek hava debisinde çalışması nedeniyle olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, bu durumun gün boyunca devam eden

yüksek PVT yüzey sıcaklığından kaynaklanmış olabileceği düşünülmüştür. Bu durum, hava hızının termal verimlilik açısından etkinliğini göstermektedir. Ayrıca hava sıcaklığı arttıkça ve hava hızı azaldıkça termal verimliliğin arttığı söylenebilir.



Şekil 6.8. Deneylerde PVT'de anlık termal verimliliğin değişimi.

Bu tez çalışmasında ısıl verim, elektriksel verim ve COP karşılaştırılmaktadır. VAV kontrollü sistemde yüksek dış hava ve PV yüzey sıcaklığı nedeniyle algoritma çoğunlukla fan güç tüketimini maksimum değerlere çıkarmış, bu nedenle COP değeri sabit hava debisine göre daha düşük çıkmıştır. COP açısından CAV sisteminde ayarlanan hava debisi değerinin optimum olabileceği düşünülmektedir. Sistemler ısıl verim açısından değerlendirildiğinde, CAVPVTD sistemi küçük bir farkla diğerinden daha iyi performans göstermiştir. Bu durum VAV sistemindeki hava hızının daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Sistemler elektrik verimliliği açısından değerlendirildiğinde, VAVPVTD sistemi küçük bir farkla diğerinden daha iyi performans göstermiştir. Test edilen sistemler ve koşullar için, VAVPVTD'nin elektriksel verimlilik açısından iyi performans gösterdiği, ancak termal verimlilik açısından biraz daha düşük ve COP açısından önemli

ölçüde daha düşük olduğu belirlenmiştir. Yapılan hesaplamalar neticesinde 1., 2., 3. ve 4. gün için belirlenen ortalama COP değerleri değişken hava debili kurutma sistemde sırasıyla 16,65, 16,22, 19,85 ve 18,48 olarak, sabit hava debili kurutma sistemi için sırasıyla 31,58, 30,91, 30,92 ve 29,61 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca termal / elketriksel verimlerin ortalama değerleri her bir gün için sırasıyla değişken hava debili kurutma sisteminde, 30,8 / 11,14, 30,9 / 11,09, 28,67 / 10,95 ve 28,87 / 11,11 olarak, sabit hava debili kurutma sisteminde 32,28 / 9,82, 31,87 / 9,76, 31,53 / 9,63 ve 30,1 / 9,77 olarak hesaplanmıştır.

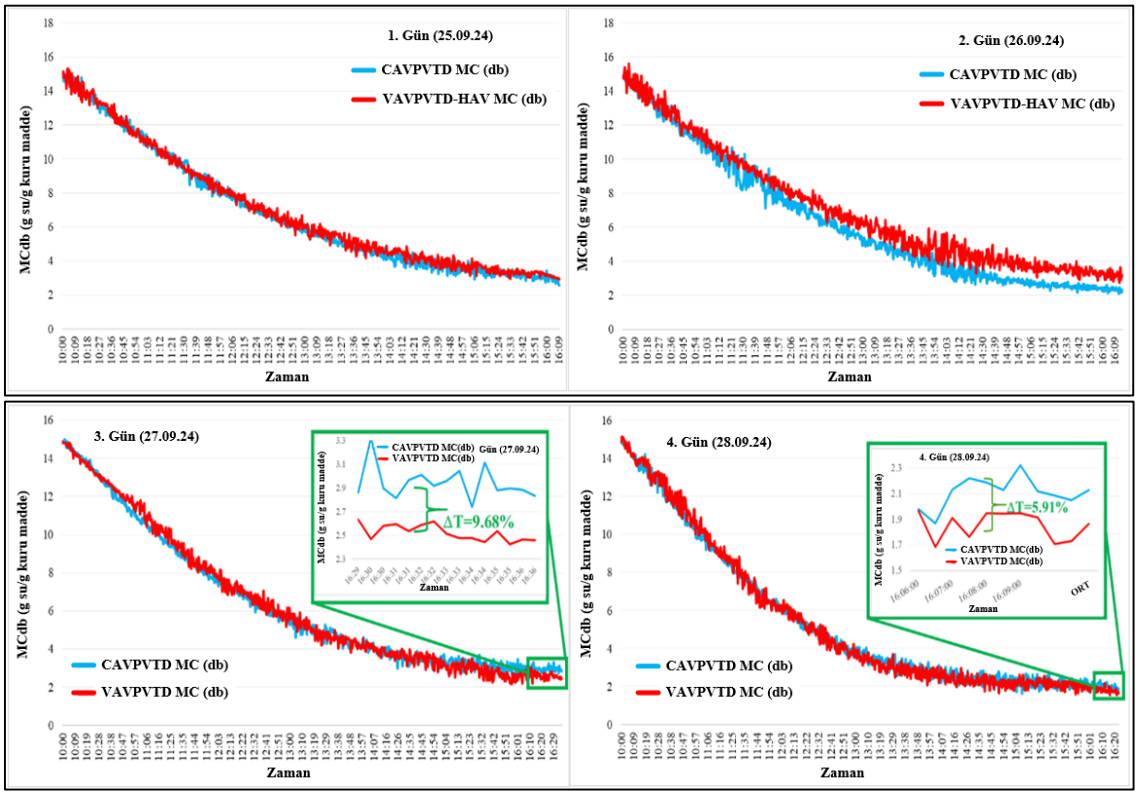
Yapılan tez çalışmasında kütle aktarım katsayıları $1{,}14 \times 10^{-3}$ m/s ile $4{,}1 \times 10^{-6}$ m/s arasında değişmiştir. Yapılana deneylerde genel olarak benzer değerler oluşurken 2. gün'de deneyin sonuna doğru bir ayrışma gözlemlenmiştir. Bu durumun efektif hava debisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ortalama efektif difüzivite katsayıları karşılaştırıldığında $4{,}8 \times 10^{-7}$ m^2/s ile $7{,}75 \times 10^{-7}$ m^2/s arasında değişmiştir. En yüksek değer 4. günde VAVPVTD'de elde edilmiştir. CAVPVT, 1. gün ve 2. gün'de sırasıyla %4,4 ve %20,38 oranında daha iyi bir performans sergilemiştir, ancak 3. ve 4. gün'de sırasıyla %2,31 ve %2,2'lik daha düşük De değeri ile daha az başarılı olduğu görülmüştür. De'nin önceki araştırmacılarla tutarlı olarak artan kurutma havası sıcaklığı ile arttığı gözlemlenmiştir [25, 26]. Fterich ve arkadaşları [25] De değerinin 40 °C ve 60 °C kurutma havası sıcaklıklarında domatesler için sırasıyla $1{,}02 \times 10^{9}$ m^2/s ve $3{,}27 \times 10^{-9}$ m^2/s olduğunu bildirmiştir. Gupta ve arkadaşları [26] farklı modlarda yeşil çay kurutması için $4{,}97 \times 10^{-9}$ m^2/s elde etmişlerdir.

6.2. Kurutma Analizleri

Kurutma havası sıcaklıkları ve nihai nemdeki günlük değişimler hem kurutma hızını hem de kurutma sürecinin süresini etkilemiştir. 1. gün'de, CAVPVTD-HAV'daki maksimum kurutma odası çıkış havası sıcaklığı (MDCÇHS) CAVPVTD'dekinden %1,62 daha yüksekti. Diğer günler için MDCÇHS'ler sırasıyla %1,53, %2,74 ve %1,64 daha yüksek bulunmuştur. Beklendiği gibi, maksimum kurutma odası çıkış sıcaklığı 4. gün, CAVPVTD ve VAVPVTD'de sırasıyla 38,93 °C ve 39,57 °C olmuştur. Sıcaklığın etkisiyle kurutma oranları artmış ve buna bağlı olarak kurutma süresi kısalmıştır. Bu bulgular, kurutma süreçlerini optimize etmek için sıcaklık kontrolü ve hava hızının önemini vurgulamaktadır. 1. gün'de, CAVPVTD-HAV'deki ortalama kurutma odası çıkış havası bağıl nemi (ADCARH), CAVPVTD'dekinden %2,34 daha yüksekti. Diğer günler için ADCARH'ler değişken hava debisi sisteminde sırasıyla %0,48, %7,98 ve %2,69 daha yüksek bulunmuştur. Buna göre,

en yüksek ADCARH 3. gün'de VAVPVTD'de gerçekleşmiştir. Bu da diğer sisteme kıyasla daha düşük bir bağıl nem değerine (%9,68) ulaşılmasında etkili olduğu görülmüştür.

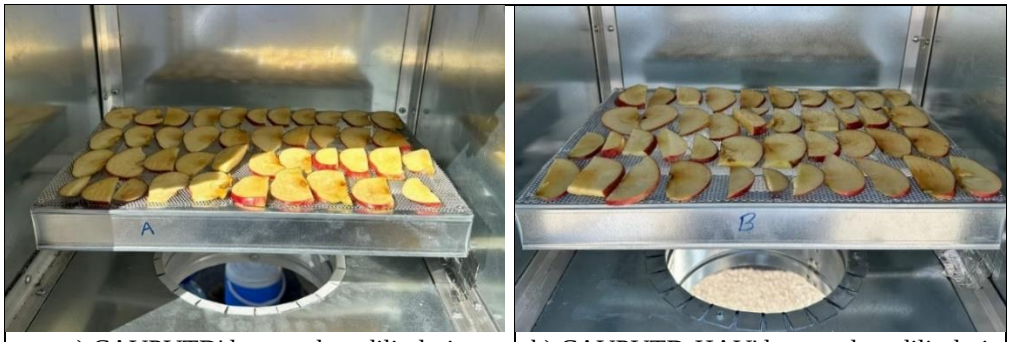
Elma dilimlerinin kuruma özellikleri, zamanın bir fonksiyonu olarak nem davranışı açısından sunulmuştur. Elma dilimlerinin kurutulmasına dair deneysel veriler, algoritmanın uygunluğunu belirlemek amacıyla yapılan deneylerle toplanmıştır. Şekil 6.9'da kurutma havası sıcaklığının, elma dilimlerindeki nem içeriği üzerindeki etkisi grafiksel olarak gösterilmektedir. Elma dilimlerinin başlangıçtaki nem içeriği 14,87 g su/g kuru madde olarak belirlenmiştir. Kurutma işlemini nihai nem içeriğinde (MC) sonlandırmak için numunelerin ağırlığı her 30 saniyede bir ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Elma dilimlerinin saat 14:00'a kadar hızla nem kaybettiği ve daha sonra nem kaybının önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Şekil 6.9'da görüldüğü gibi, kurutma sıcaklığı yüksek olduğunda, elma dilimlerinin yüzeyinden taşınan nem içeriğinin daha hızlı azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 6.9'da, 1. gün ve 2. gün'deki deneyler sırasında CAVPVTD-HAV'da ürün üzerinden akan daha yüksek hava debisi ve daha düşük kurutma havası sıcaklığı nedeniyle daha düşük MC değerleri oluşmuştur. Buna karşılık, VAVPVTD 3. gün ve 4. gün'de sırasıyla %9,68 ve %5,91 oranında daha iyi performans göstermiştir.



Şekil 6.9. Anlık nem içeriğinin değişimi.

Yapılan tez çalışmasında, kuruma sıcaklığındaki ve hava akışındaki artış, üründeki ısı transferini artırarak, suyun difüzyon sürecinin itici güçlerinden biri olan buhar basıncı elma dilimlerinde artırmış ve bu durum kuruma hızını yükseltmiştir. Deneyin başında, yüksek iç ve yüzey nemi nedeniyle kuruma hızının daha yüksek olduğu gözlemlenmiş, ancak kuruma hızındaki azalma sonrasında elma dilimlerinde ki nemin buharlaşması da azalmıştır.

Şekil 6.13, Şekil 6.14, Şekil 6.15 ve Şekil 6.16, taze ve kurutulmuş elma dilimlerinin her gün için fotoğrafları gösterilmektedir. Fotoğraflar, elma dilimlerinin zaman içinde nasıl değiştiğini, kurudukça küçüldüğünü ve renk değiştirdiğini göstermektedir. Büzülme ve renk görselliği açısından kurutulmuş ürün kalitesi çevresel koşullara bağlı olarak değişmiştir. Dış hava sıcaklığı arttıkça kurutma havası sıcaklığı da artmış ve buna bağlı olarak kurutulmuş elma dilimleri daha hızlı kurumuş ancak büzüşme artmıştır.

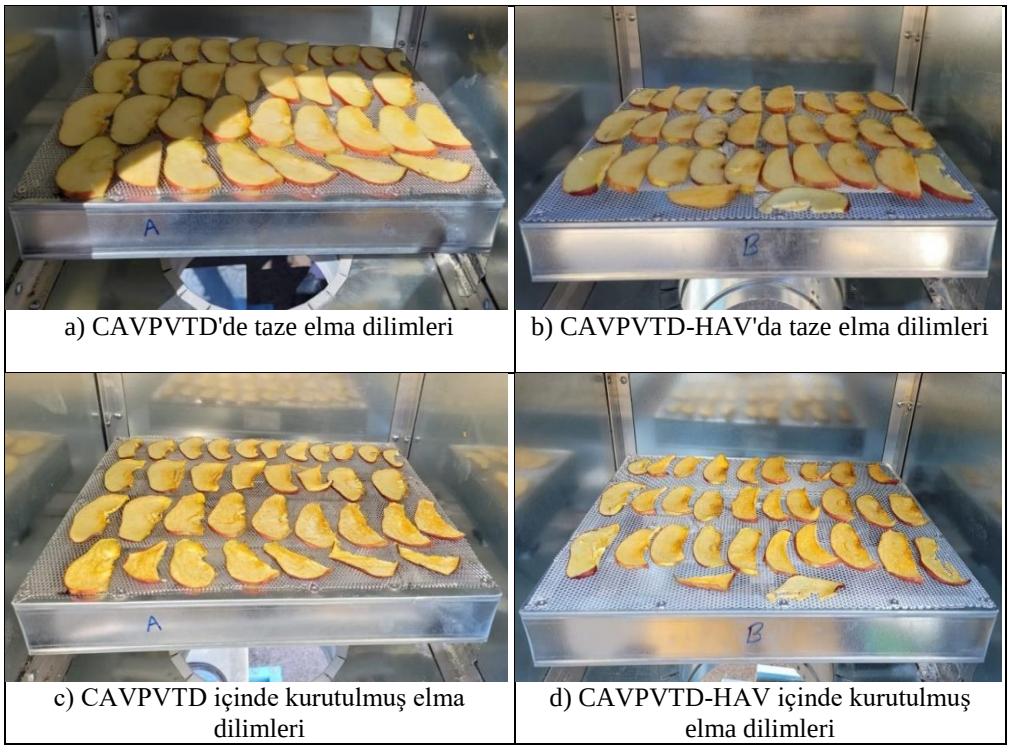


a) CAVPVTD'de taze elma dilimleri | b) CAVPVTD-HAV'da taze elma dilimleri



c) CAVPVTD içinde kurutulmuş elma dilimleri | d) CAVPVTD-HAV içinde kurutulmuş elma dilimleri

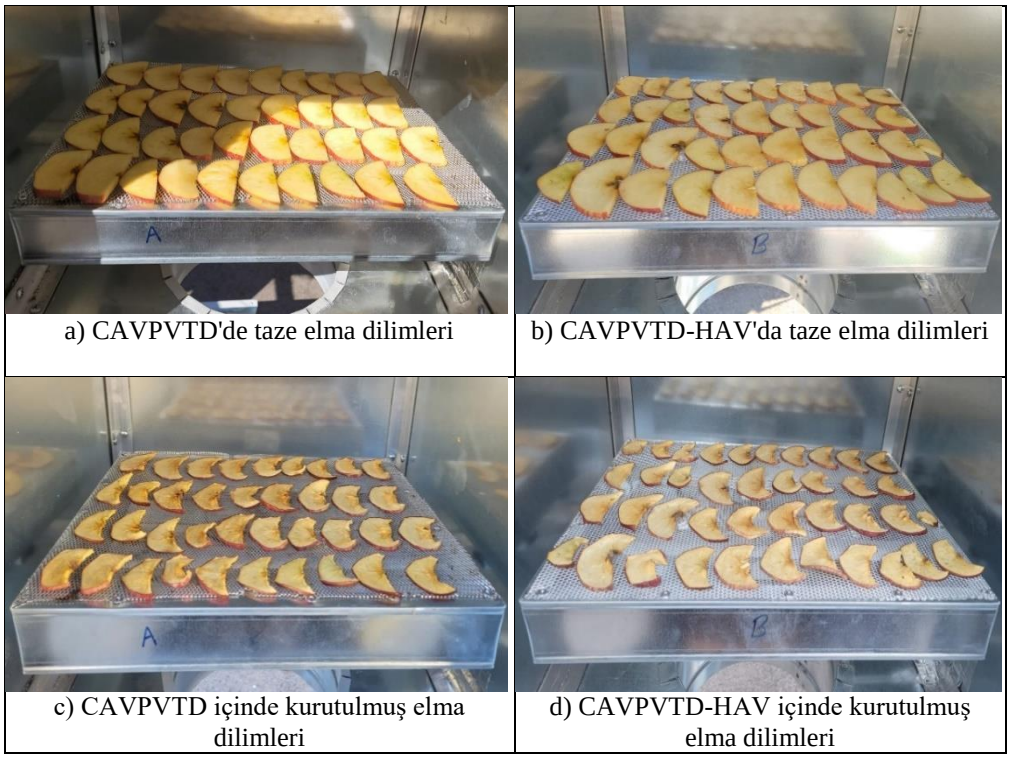
Şekil 6.10. 1. Gün deneylerinden taze ve kurutulmuş elma dilimlerinin fotoğrafları



a) CAVPVTD'de taze elma dilimleri | b) CAVPVTD-HAV'da taze elma dilimleri

c) CAVPVTD içinde kurutulmuş elma dilimleri | d) CAVPVTD-HAV içinde kurutulmuş elma dilimleri

Şekil 6.11. 2. Gün deneylerinden taze ve kurutulmuş elma dilimlerinin fotoğrafları



a) CAVPVTD'de taze elma dilimleri | b) CAVPVTD-HAV'da taze elma dilimleri

c) CAVPVTD içinde kurutulmuş elma dilimleri | d) CAVPVTD-HAV içinde kurutulmuş elma dilimleri

Şekil 6.12. 3. Gün deneylerinden taze ve kurutulmuş elma dilimlerinin fotoğrafları



a) CAVPVTD'de taze elma dilimleri

b) CAVPVTD-HAV'da taze elma dilimleri



c) CAVPVTD içinde kurutulmuş elma dilimleri

d) CAVPVTD-HAV içinde kurutulmuş elma dilimleri

Şekil 6.13. 4. Gün deneylerinden taze ve kurutulmuş elma dilimlerinin fotoğrafları

Tüm araştırma bulgularına göre dünya genelinde PVT sistemli kurutucuların birçok uygulaması ve farklı tasarım modelleri bulunmaktadır. PVT sistemli kurutucu tasarımların maliyetleri, üretilen ve tüketilen enerjinin etkin kullanımı gibi unsurlar uygulanabilirlik noktasnda önemli parametreler arasında yer almaktadır. Geliştirilen tasarımda PVT sistemi hava ile etkin bir şekilde soğutulurken aynı zamanda elde edilen atık ısının değerlendirilmesine yönelik yapılan çalışma ile minimum maliyetle maksimum seviyede enerji üretimi ve minimum seviyede enerji tüketimine yönelik olarak yeni bir tasarım gerçekleştirilmiştir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Bu tez çalışması kapsamında biri düz tip diğeri homojen hava dağılımına sahip iki PVTD sistemi oluşturulmuş ve dört gün boyunca test edilmiştir. VAV için oluşturulan bir algoritma ile PV yüzey sıcaklığına göre hava debisi kontrol edilmiş ve sabit hava debili PVTD performansı ile karşılaştırılmış ve aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- CAVPVTD'nin ortalama çıkış havası sıcaklığı, 1. gün'den 4. gün'e kadar sırasıyla CAVPVTD-HAV ve VAVPVTD'den %4,2, %4,06, %2,85 ve %2,64 daha yüksekti, bu da kurutmanın daha yüksek sıcaklıklarda yapıldığını göstermektedir.
- Ortalama verimlilikler karşılaştırıldığında, en yüksek termal verimlilik seviyesi 4. gün'de CAVPVT'de %32,28 iken, en yüksek elektrik verimliliği aynı gün VAVPVTD'de %11,14 olmuştur. Bunun nedeni VAV sisteminde PV'de daha iyi soğutma elde edilmesidir.
- Sistemler elektrik verimliliği açısından incelendiğinde, VAVPVTD sistemi %12,06 oranında daha iyi performans göstermiştir.
- Sistemler termal verimlilik açısından değerlendirildiğinde, CAVPVTD sistemi %9,9 oranında daha iyi performans göstermiştir. Bunun nedeni, VAV sistemindeki artan hava debisinden dolayı daha düşük çıkış havası sıcaklığı elde edilmesinden kaynaklanmıştır.
- VAV kontrollü sistemdeki yüksek dış hava ve yüzey sıcaklıkları nedeniyle, algoritma fan güç tüketimini maksimum değerlere çıkarmış, bu da sabit hava debisine sahip sistemden her zaman daha düşük bir COP değeri ile sonuçlanmıştır. COP açısından, CAV sisteminde belirlenen hava debisi değerinin optimum bir değer olduğu düşünülmektedir.
- Ortalama etkin difüzivite katsayıları karşılaştırıldığında, 4,8 × 10-7 m^2/s ile 7,75 × 10-7 m^2/s arasında hesaplanmıştır.
- Kurutulmuş elma dilimlerinin nihai nem içerikleri karşılaştırıldığında, VAVPVTD 3. gün ve 4. gün'de sırasıyla %9,68 ve %5,91 oranında daha iyi performans göstermiştir.

Sonuç olarak, incelenen sistemler ve koşullar için, VAVPVTD elektrik verimliliği açısından iyi performans göstermiş, ancak termal verimlilik açısından biraz daha kötü ve performans katsayısı (COP) açısından önemli ölçüde daha düşük performans göstermiştir. Başka bir açıdan bakıldığında, VAV kontrolü ve yeni tasarım uygulamalarının elektrik verimliliğini

%12,06'ya kadar artırdığı ve kurutma süresini kısalttığı görülmüştür. Öte yandan, PVT ısıl verimlilikte %9,9'a kadar daha düşük performans göstermiştir. Ayrıca, VAVPVTD kurutma etkinliği açısından %10'a kadar daha iyi performans göstermiştir. Bu çalışmada, yüzey sıcaklığına göre hareket eden algoritma, PVT'nin yüzey sıcaklığını 40 °C'de kontrol etmeye çalışmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda kendi enerjisini üreten kurutucular için örnek bir kurutma modeli ortaya konmuştur.

7.2. Öneriler

Bu tez çalışması neticesinde sonraki yapılacak çalışmalar için aşağıdaki öneriler sunulabilir:

- VAV kontrol algoritmasını, PV yüzey sıcaklığına ek olarak çıkış havası sıcaklığı ve ortam sıcaklığı gibi diğer parametrelere duyarlı hale getirebilirsiniz. Böylece sistem, termal ve elektriksel verimlilik arasında daha iyi bir denge sağlanabilir.
- VAV sisteminde kullanılan fanın optimum hava debisi aralıklarını belirlemek ve bu değerleri sistem yüklerine göre dinamik olarak ayarlamak için daha gelişmiş algoritmalar geliştirilebilir.
- Sistem performansını farklı mevsim koşullarında test ederek, enerji üretimi ve verimlilik parametrelerindeki değişimleri incelenebilir.
- Güneş ışınımının düşük olduğu anlarda kullanılmak üzere PV modüllerden üretilen fazla enerjiyi depolayacak batarya veya termal enerji depolama sistemleri entegre edilebilir.
- Farklı PV teknolojileri (ör. monokristal, polikristal, ince film) kullanarak sistem performansındaki değişiklikler değerlendirilebilir.
- Hava akışının homojenliğini artırmak için hava akışının tasarımını optimize edebilir veya difüzörler eklenebilir.
- Sistemi farklı tarım ürünleri veya endüstriyel kurutma gereksinimleri olan materyaller üzerinde test ederek, kullanım alanları genişletilebilir.
- Kurutulan ürünlerin renk, tat, doku ve besin değerlerindeki değişiklikleri analiz ederek sistemin kalite üzerindeki etkisini değerlendirilebilir.
- Belirli bir yüzey sıcaklığı yerine, ürün tipi ve ortam koşullarına bağlı optimum sıcaklık aralıklarını belirleyerek bu değerler üzerinde adaptif bir kontrol sistemi geliştirilebilir.
- Sistemin performansını hava akışı, enerji dönüşümü ve nem transferi açısından detaylı bir şekilde analiz etmek için HAD simülasyonları yapılabilir.

- Sistem kontrolü ve performans optimizasyonu için makine öğrenimi algoritmaları entegre edilebilir.
- VAV sistemi yerine pasif soğutma yöntemleri (ör. radyatif soğutma, faz değişim malzemeleri) entegre edilerek enerji tüketimi azaltılabilir.
- PV yüzeyini daha etkin soğutmak için buharlaştırma tabanlı soğutma sistemleri kullanılabilir.
- Sistemin bakım maliyetlerini ve gerekliliklerini analiz ederek bu alanda iyileştirmeler yapılabilir.

Bu öneriler, hem sistem performansını artırmak hem de kullanım alanlarını genişletmek için bir yol haritası sağlayabilir. Çalışmanın hedefine ve bütçeye bağlı olarak belirli alanlara öncelik verilebilir.

KAYNAKLAR

1. Pérez-Lombard, L., Ortiz, J. and Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings,* 40(3), 394–398.

2. TheBaster, M.E. (2019). *Modelling the performance of Air Source Heat Pump Systems*, Yüksek Lisans Tezi, Linkoping Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü, İsveç, 6-7.

3. Sarı, E., Güven, Y., Aktaş, M. (2024). Solar powered eco design timber drying system. *Journal of Polytechnic*, 27(4), 1473-1489.

4. Koşan, M., Karaca Dolgun, G., Aktekeli, B., Saçılık, K., Aktaş, M. (2022). Design and analysis of new solar-powered sustainable dryers: Alfalfa crop. *Journal of Food Process Engineering,* 46(3), e14253.

5. Arslan, E., Aktaş, M. (2020). 4E analysis of infrared-convective dryer powered solar photovoltaic thermal collector. *Solar Energy*, 208, 46–57.

6. Velić, D., Planinić, M., Tomas, S., Bilić, M. (2004). Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. *Journal of Food Engineering*, 64(1), 97–102.

7. Hu, J., Bi, J., Wang, W., Li, X. (2024). Comparison of characterization and composition of melanoidins from three different dried apple slices. *Food Chemistry,* 455, 139890.

8. Lina W., Mavd P.R.T., Ahmad A., Haoshui Y., Kamal A.R.I., Omid M. and Somchai W. (2020). A holistic and state-of-the-art review of nanotechnology in solar cells. *Sustainable Energy Technologies and Assessments,* 54, 102864.

9. İnternet: Isıtma & Soğutma Sistemlerinde Enerji Verimliliği, (2017). URL: http://www.imsad.org/Uploads/Etkinlikler/Adana/demirdokum_mustafa_balkan.pdf, Son Erişim Tarihi: 14.01.2024.

10. Evangelisti, L., Vollaro, R.L. and Asdrubali, F. (2019). Latest advances on solar thermal collectors: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 114, 109318.

11. Kim, J.H., Park, S.H. and Kim J.T. (2014). Deneyerimental performance of a photovoltaic- thermal air collector, *Energy Procedings,* 48, 888-894.

12. Kalogirou, S.A. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Progress Energy Combustion Science,* 30, 231-295.

13. Sancar, İ. (2014). *Adıyaman iklim şartlarında havalı güneş kollektörleri ile mahal ısıtılmasının araştırılması.* Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa, Türkiye.

14. Charalambous, P.G., Maidment, G.G., Kalogirou, S.A. and Yiakoumetti, K. (2007). Photovoltaic thermal (PVT) collectors: A review. *Applied Thermal Engineering,* 27, 275–286.

15. İnternet: Yoğunlaştırılmış Solar Enerji Sistemleri Güneş Depoluyor, (2017). URL: https://www.kilsanblog.com/yesil-cevreci-ekolojik/yogunlastirilmis-solar-enerji-sistemleri-gunes-depoluyor/, Son Erişim Tarihi: 12.05.2024.

16. Hamada, A. (2019). Solar tracking photovoltaic panel. Degree Project in Mechanical Engineering, Stockholm, Sweden.

17. Mojiri, A., Taylor, R., Thomsen, E., Rosengarten, G. (2013). Spectral beam splitting for efficient conversion of solar energy-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 28, 654-663.

18. Zondag, H.A., de Vries, D.W., van Helden, W.G.J., van Zolingen, R.J.C., van Steenhoven, A.A. (2003). The yield of different combined PV-thermal collector designs. *Solar Energy,* 74, 253-69.

19. Dongellini, M., Naldi C. and Morini, G. (2015). Annual Performances of Reversible Air Source Heat Pumps for Space Conditioning. *Energy Procedia,* 78, 1123-1128.

20. Wang, X., Xia, L., Bales, C., Zhang, X., Copertaro, B., Pan, S. and Wu, J. (2020). A systematic review of recent air source heat pump (ASHP) systems assisted by solar thermal, photovoltaic and photovoltaic/thermal sources. *Renewable Energy,* 146, 2472-2487.

21. Marin, J.M., Zalba, B., Cabeza, L.F. and Mehling, H. (2005). Improvement of a thermal energy storage using plates with paraffin-graphite composite. *International Journal of Heat and Mass Transfer,* 48, 2561-2570.

22. Wang, Z., Guo, P., Zhang, H., Yang, W. and Mei, S. (2017). Comprehensive review on the development of SAHP for domestic hot water. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 72, 871-881.

23. Barnwal, P., Tiwari, G. N. (2008). Grape drying by using hybrid photovoltaic-thermal (PV/T) greenhouse dryer: An experimental study. *Solar Energy,* 82(12), 1131–1144.

24. Kong, D., Wang, Y., Li, M., Keovisar, V., Huang, M., Yu, Q. (2020). Experimental study of solar photovoltaic/thermal (PV/T) air collector drying performance. *Solar Energy,* 208, 978–989.

25. Fterich, M., Elamy, M. I., Touti, E., Bentaher, H. (2023). Experimental and numerical study of tomatoes drying kinetics using solar dryer equipped with PVT air collector. *Engineering Science and Technology, an International Journal,* 47, 101524.

26. Gupta, A., Biswas, A., Das, B., Reddy, B. V. (2022). Development and testing of novel photovoltaic-thermal collector-based solar dryer for green tea drying application. *Solar Energy,* 231, 1072–1091.

27. Gupta, A., Das, B., Mondol, J. D. (2020). Experimental and theoretical performance analysis of a hybrid photovoltaic-thermal (PVT) solar air dryer for green chillies. *International Journal of Ambient Energy,* 43(1), 2423–2431.

28. Dorouzi, M., Mortezapour, H., Akhavan, H. R., Moghaddam, A. G. (2018). Tomato slices drying in a liquid desiccant-assisted solar dryer coupled with a photovoltaic-thermal regeneration system. *Solar Energy,* 162, 364–371.

29. Gupta, A., Das, B., Biswas, A., Mondol, J. D. (2022). An environmental and economic evaluation of solar photovoltaic thermal dryer. *International Journal of Environmental Science and Technology,* 19, 10773-10792.

30. Kong, D., Wang, Y., Li, M., Liang, J., Liu, X., Yin, G. (2022). Quality study on different parts of Panax notoginseng root drying with a hybrid drying system powered by a solar photovoltaic/thermal air collector and wind turbine. *Energy,* 245, 123216.

31. Tiwari, S., Tiwari, G. N., Al-Helal, I. M. (2016). Performance analysis of photovoltaic–thermal (PVT) mixed mode greenhouse solar dryer. *Solar Energy,* 133, 421–428.

32. Fterich, M., Chouikhi, H., Bentaher, H., Maalej, A. (2018). Experimental parametric study of a mixed-mode forced convection solar dryer equipped with a PV/T air collector. *Solar Energy,* 171, 751–760.

33. Daş, M., Akpınar, E. K. (2020). Determination of thermal and drying performances of the solar air dryer with solar tracking system: Apple drying test. *Case Studies in Thermal Engineering,* 21, 100731.

34. Beigi, M. (2016). Hot air drying of apple slices: dehydration characteristics and quality assessment. *Heat and Mass Transfer,* 52, 1435–1442.

35. Akpınar, E. K., Midilli, A., Biçer, Y. (2005). Thermodynamic analysis of the apple drying process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering,* 219(1), 1–14.

36. Arslan, E., Can, Ö.F., Koşan, M., ve ark. (2023). Numerical and Deneyerimental assessment of a photovoltaic thermal collector using variable air volume. *Thermal Science and Engineering Progress,* 39, 101735.

37. Ziapour, B.M., Palideh, V., Mokhtari, F. (2016). Performance improvement of the finned passive PVT system using reflectors like removable insulation covers. *Applied Thermal Engineering,* 94, 341-349.

38. Fudholi, A., Zohri, M., Jin, G.L., ve ark. (2018). Energy and exergy analyses of photovoltaic thermal collector with ∇-groove. *Solar Energy,* 159, 742-750.

39. Franklin, J.C., Chandrasekar, M. (2019). Performance enhancement of a single pass solar photovoltaic thermal system using staves in the trailing portion of the air channel. *Renewable Energy,* 135, 248-258.

40. Choi, H.U., Choi, K.H. (2022). Performance Evaluation of PVT Air Collector Coupled with a Triangular Block in Actual Climate Conditions in Korea. *Energies,* 15(11), 4150.

41. Kim, J.H., Yu, J.S., Kim, J.T. (2021). An Deneyerimental Study on the Energy and Exergy Performance of an Air-Type PVT Collector with Perforated Baffle. *Energies,* 14(10), 2919.

42. Can, Ö.F., Arslan, E., ve ark. (2012) Experimental and numerical assessment of PV-TvsPV by using waste aluminum as an industrial symbiosis product. *Solar Energy,* 234, 338-347.

43. Tahmasbi, M., Siavashi, M., Norouzi, A.M., Doranehgard, M.H. (2021). Thermal and electrical efficiencies enhancement of a solar photovoltaic-thermal/air system (PVT/ air) using metal foams. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers,* 124, 276–289.

44. Kim, J., Nam, Y. (2019). Study on the Cooling Effect of Attached Fins on PV Using CFD Simulation, *Energies,* 12(4), 758.

45. Shoeibi, S., Kargarsharifabad, H., Mirjalily, S.A., Zargarazad, M. (2021). Performance analysis of finned photovoltaic/thermal solar air dryer with using a compound parabolic concentrator. *Applied Energy,* 304, 117778.

46. Baysan, U., Harun, A. I., Koç, M. (2024). Evaluation of innovative drying approaches in celery drying considering product quality and drying energy efficiency. *Innovative Food Science & Emerging Technologies,* 93, 103636.

47. Laskar, A. A., Ahmed, M., Vo, D. V. N., Abdullah, A., Shahadat, M., Mahmoud, M. H., Yusuf, M. (2023). Mathematical modeling and regression analysis using MATLAB for optimization of microwave drying efficiency of banana. *Thermal Science and Engineering Progress,* 46, 102157.

48. Fu Z., Li Y., Liang X., Lou S., Qiu Z., Cheng Z., Zhu Q. (2021). Deneyerimental investigation on the enhanced performance of a solar PVT system using micro-encapsulated PCMs. *Energy,* 228, 120509.

49. Menon G. S., Murali S., Elias J., Aniesrani Delfiya, D. S., Alfiya, P. V. and Samuel, Manoj P. (2022). Deneyerimental investigations on unglazed photovoltaic-thermal (PVT) system using water and nanofluid cooling medium. *Renewable Energy,* 188, 986-996.

50. Aktaş, A., Koşan, M., Aktekeli, B., Güven, Y., Arslan, E., Aktaş, M. (2024). Numerical and experimental investigation of a single-body PVT using a variable air volume control algorithm. *Energy,* 307, 132793.

51. Karaca, G., Dolgun, E. C., Koşan, M., Aktaş, M. (2019). Photovoltaic-Thermal solar energy system design for dairy industry. *Journal of Energy Systems,* 3(2), 86–95.

52. Fang, H., Zhang, N., Cai, G., Chen, H., Ma, J., Wu, D., Du, T., Wang, Y. (2024). Operation strategy optimization and heat transfer characteristic analysis of photovoltaic/thermal module series connected with flat plate solar collector: System experimental study. *Renewable Energy,* 229, 120770.

53. Aktaş, M., Şevik, S., Doğan, H., Öztürk, M. (2012). Drying of tomato in a photovoltaic and thermal solar-powered continuous dryer. *Journal of Agricultural Sciences,* 18, 287–298.

54. Zare, D., Minaei, S., Zadeh, M. M., Khoshtaghaza, M. H. (2006). Computer simulation of rough rice drying in a batch dryer. *Energy Conversion and Management,* 47(18–19), 3241–3254

55. Aktaş, M., Kara, M. Ç. (2014). Sliced kiwi drying in a solar energy and heat pump dryer. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University,* 28(4), 733-741.

56. Karaca, G., Dolgun, E. C., Aktaş, M. (2020). Design of a new energy efficient and hygienic system for drying honey. *Journal of Polytechnic,* 23(3), 713-719.

57. Aktaş, M., Khanlari, A., Amini, A., Şevik, S. (2017). Performance analysis of heat pump and infrared–heat pump drying of grated carrot using energy-exergy methodology. *Energy Conversion and Management,* 132, 327-338.

58. Aktaş, M., Khanlari, A., Aktekeli, B., Amini, A. (2017). Analysis of a new drying chamber for heat pump mint leaves dryer. *International Journal of Hydrogen Energy,* 42(28), 18034-18044.

59. Aghbashlo, M., Mobli, H., Rafiee, S., Madadlou, A. (2012). Energy and exergy analyses of the spray drying process of fish oil microencapsulation. *Biosystems Engineering,* 111(2),229-241.

60. Aktaş, M., Şevik, S., Dolgun, E. C., Demirci, B. (2019). Drying of grape pomace with a double pass solar collector. *Drying Technology*, 37, 105-117.

61. Yamankaradeniz, R., Horuz, İ., Coşkun, S., Kaynaklı, Ö., Yamankaradeniz, N. (2021). Air conditioning principles and applications. Dora Publications (Fourth Edition), 21, In Turkish.

62. Babalis, S. J., Papanicolau, E., Kyriakis, N., Belessiotis, V. G. (2006). Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (Ficus carica). *Journal of Food Engineering*, 75(2), 205–214.

63. Aktaş, M., Gönen, E. (2014). Bay leaves drying in a humidity controlled heat pump dryer. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29(2), 433-441.

64. Dinçer, İ., Hussain, M. M. (2002). Development of a new Bi–Di correlation for solids drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer,* 45(15), 3065-3069.

65. Dinçer, İ. (1996). Development of a new number (the Dincer number) for forced-convection heat transfer in heating and cooling applications. *International Journal of Energy Research,* 20, 419-422.

66. Holman, J. P., *Experimental Methods for Engineers* (6st Ed.), McGraw-Hill, Singapore, 48-143, 1994.

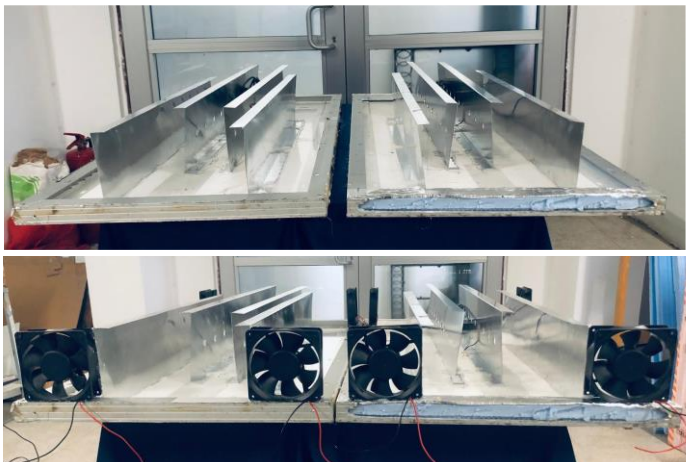
67. Kong, D., Wang, Y., Li, M., Keovisar, V., Huang, M., Yu, Q. (2020). Experimental study of solar photovoltaic/thermal (PV/T) air collector drying performance. *Solar Energy*, 208, 978–989.

EKLER

EK-1. Yeni nesil güneş enerjili bir kurutucunun imalat fotoğrafları



EK-2. PVT panel imalat süreci fotoğrafı





EK-3. Kurutma odası imalat süreci fotoğrafı











Gazili olmak ayrıcalıktır