



**GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ TERMAL FOTOVOLTAİK KURUTUCU
TASARIMI VE KURUTMA PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ**

Coşkun YÜKSEL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2024

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmada 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.

Coşkun YÜKSEL

27/05/2024

GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ TERMAL FOTOVOLTAİK KURUTUCU TASARIMI VE KURUTMA PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Coşkun YÜKSEL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2024

ÖZET

Sürdürülebilir bir gelecek için yaşamın kaynağını oluşturan en temel bileşen olan gıdaların uygun şekilde depolanması büyük önem taşımaktadır. Gıdaların farklı mevsim koşullarında tüketilebilmesi ve bozulmadan saklanabilmesi gerekliliği, kurutma sistemlerinin üretimini ve geliştirilmesini motive etmiştir. Bu bağlamda, hem temiz bir enerji kaynağına dayanan hem de uygun maliyetli olan güneş enerjili kurutucular sürdürülebilir bir geleceğe katkı sağlamaktadır. Bu deneysel çalışma, V oluklu çift geçişli bir güneş enerjili kurutucunun üretimine ve termal depolama ünitesi de dahil olmak üzere farklı modifikasyonlarla performansının iyileştirilmesine odaklanmaktadır. Bu amaçla ilk olarak, V oluklu ve çift geçişli bir PVT üretilmiş (MODEL_1) ve daha sonra bu fotovoltaiik panele parafin bazlı bir termal depolama ünitesi (MODEL_2) entegre edilmiştir. Her iki deneysel sistem de aynı çevresel koşullar altında eş zamanlı olarak analiz edilmiştir. Kurutma ürünü olarak altın elma dilimleri tercih edilmiş ve hava akışı 70×70 mm'lik fanlar aracılığıyla sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlarda, güneş kolektörünün ısı verimi MODEL_1 için %40,94 ile %77,18 arasında değişirken, MODEL_2 için bu değerler %55,11 ile %78,47 arasında dalgalanmıştır. Kurutma odasının toplam ekserji verimleri ise MODEL_1 ve MODEL_2 için sırasıyla %65,69 ve %66,23 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca termal enerji depolama ünitesi içeren PVT güneş enerjili kurutucuda kurutma işleminin daha erken tamamlandığı gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu : 92802

Anahtar Kelimeler : PVT, Enerji-ekserji, V-oluklu güneş kurutucu, Güneş enerjisi, Termal enerji depolama, Sürdürülebilirlik indeksi, Performans iyileştirme.

Sayfa Adedi : 67

Danışman : Doç. Dr. Erdem ÇİFTÇİ

DESIGN OF SOLAR ENERGY ASSISTED THERMAL PHOTOVOLTAIC DRYER
AND INVESTIGATION OF DRYING PARAMETERS

(M. Sc. Thesis)

Coşkun YÜKSEL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2024

ABSTRACT

For a sustainable future, proper food storage, the most basic component that forms the source of life, is of great importance. The need for foods to be consumed under different seasonal conditions and stored without spoiling has motivated the production and development of drying systems. In this context, solar dryers, based on a clean energy resource and cost-effective, contribute to a sustainable future. This experimental work focuses on fabricating a V-grooved double-pass solar dryer and improving its performance with different modifications, including a thermal storage unit. For this purpose, a V-grooved and double-pass PVT was produced (MODEL_1), and then a paraffin-based thermal storage unit (MODEL_2) was integrated into this photovoltaic panel. Both experimental systems were analyzed simultaneously under the same environmental conditions. Golden apple slices were preferred as the drying product, and airflow was provided through 70×70 mm fans. In the results obtained, while the thermal efficiency of the solar collector varied between 40.94% and 77.18% for MODEL_1, these values fluctuated between 55.11% and 78.47% for MODEL_2. The total exergy efficiencies of the drying chamber were calculated as 65.69% and 66.23% for MODEL_1 and MODEL_2, respectively. Additionally, it was observed that the drying process was completed earlier in the PVT solar dryer containing a thermal energy storage unit.

Science Code : 92802

Key Words : PVT, Energy-exergy, V-grooved solar dryer, Solar energy, Thermal energy storage

Page Number : 67

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Erdem ÇİFTÇİ

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının başından sonuna kadar değerli bilgileri ve fikirleriyle bana yön veren, her konuda olduğu gibi tez konusunda da yardım ve desteğini esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. Erdem ÇİFTÇİ 'ye, çalışmaların hazırlanması sırasında maddi ve manevi destekte bulunan sayın Dr. Azim Doğuş TUNCER' e teşekkür ederim.

Lisans ve lisansüstü eğitimimde bilgi ve tecrübeleriyle beni geliştiren, Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümündeki saygıdeğer hocalarıma teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, bugünlere gelmemde emeği geçen anneme, babama ve kardeşime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. GÜNEŞ ENERJİSİ	5
2.1. Fotovoltaik ve Termal Fotovoltaik Paneller	5
2.2. Güneş Kolektörleri	6
2.2.1. Sabit güneş kolektörleri.....	6
2.2.2. Odaklanabilen güneş kolektörleri	10
3. KURUTMA	15
3.1. Doğal Kurutma.....	16
3.2. Yapay Kurutma	17
3.2.1. Kızılötesi ışımlı (Infrared) kurutma	17
3.2.2. Morötesi radyasyon kurutma.....	18
3.2.3. İletimle kurutma	18
3.2.4. Dondurarak (Şoklama ile) kurutma.....	19
3.2.5. Püskürtmeli (Sprey) kurutucular	20
3.2.6. Vakumda kurutma.....	20
3.2.7. Döner kurutucular	21

	Sayfa
3.2.8. Mikrodalga kurutma.....	22
3.2.9. Dielektrik kurutma	22
3.2.10. Tünel kurutucu	23
3.2.11. Akışkan yataklı kurutma	24
3.2.12. Kabinli ve bölmeli kurutucular	25
3.2.13. Silindir kurutucu	25
4. LİTERATÜR TARAMASI	27
5. DENEYSEL ANALİZ	39
5.1. Deney Düzenegi	39
5.2. Deneysel Prosedür.....	42
6. TEORİK ANALİZ	45
6.1. Güneş Kolektörüne İlişkin Hesaplamalar	45
6.2. Fotovoltaik Panele İlişkin Hesaplamalar	47
6.3. Kurutma Parametrelerine İlişkin Hesaplamalar	48
6.4. Belirsizlik Analizi	50
7. BULGULAR VE TARTIŞMA	51
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	67

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Fotovoltaik panel ayrıntıları	41
Çizelge 5.2. Kullanılan ekipman/cihazların ayrıntılı listesi.....	42
Çizelge 6.1. Deneyde kullanılan cihazların belirsizliği	50
Çizelge 7.1. Mevcut çalışmanın literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırılması.....	59



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 5.1. Deney düzeneğin şematik görünümü [MODEL_1 ve MODEL_2].....	39
Şekil 5.2. Kolektör kasası boyutları detaylı gösterimi.....	41
Şekil 7.1. Testler sırasındaki ortam sıcaklığı ve güneş ışıınımı değerleri.....	52
Şekil 7.2. PVT kolektör sıcaklık farkının zamana göre değişimi	53
Şekil 7.3. PVT kolektör ısı verimliliğinin zaman içindeki değişimi	54
Şekil 7.4. PVT toplayıcı ekserji veriminin zaman içindeki değişimi	55
Şekil 7.5. Kurutma odasının ekserji verimindeki ve altın elma dilimlerinin nem içeriğindeki zamana bağlı değişim	56
Şekil 7.6. Kurutma odasının SI ve WER değerlerinin zamanla değişimi.....	57
Şekil 7.7. PV'lerin elektriksel ekserji verimindeki zaman içindeki değişim.....	58

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Düzlemsel güneş kolektörü görünüşü.....	8
Resim 2.2. Parabolik güneş kolektörü	9
Resim 2.3. Vakum tüplü güneş kolektörü.....	10
Resim 2.4. Parabolik çanak tipi kolektör	12
Resim 2.5. Parabolik çukur toplayıcı tip kolektör	13
Resim 2.6. Merkezi alıcı (helisel alan) kolektörler.....	14
Resim 3.1. Doğal kurutma sistemi.....	17
Resim 3.2. Kızılötesi ışınlı (Infrared) kurutma sistemi	18
Resim 3.3. İletimle kurutma sistemi	19
Resim 3.4. Püskürtmeli (Sprey) Kurutma sistemi	20
Resim 3.5. Vakumda kurutma sistemi	21
Resim 3.6. Döner kurutucu sistemi.....	22
Resim 3.7. Paralel akışlı tünel kurutma sistemi.....	23
Resim 3.8. Çapraz akışlı tünel kurutma sistemi	23
Resim 3.9. Akışkan yataklı kurutma sistemi	24
Resim 3.10. Kabinli ve bölmeli kurutma sistemi.....	25
Resim 3.11. Silindirli kurutma sistemi	26
Resim 4.1. Sera kurutucusu ile entegre PV sistemi	28
Resim 4.2. PV destekli bir güneş enerjisi kurutma sistemi.....	29
Resim 4.3. Dikey bir güneş kurutucu sistemi	30
Resim 4.4. Dört geçişli güneş hava kolektörü	31
Resim 4.5. Kızılötesi destekli güneş enerjili kurutucu sistemi	32
Resim 4.6. Depolama sistemli bir güneş kurutucusu	34
Resim 4.7. Isı depolamalı dolaylı konveksiyonlu bir güneş kurutucusu	35
Resim 4.8. Gizli ısı depolamalı ve çift geçişli kurutucu	36

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Güneş hava kolektörü kasası ve emici plaka	40
Resim 5.2. Kurulan deney sistemlerinin (a) ön, (b) sol yan ve (c) üst görüşleri	43



SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A	Alan(m ²)
$\dot{E}_{kul}$	Kullanılan Enerji
$\dot{E}_{\zeta}$	Çıkan enerji
$\dot{E}_g$	Giren enerji
$\dot{m}_g$	Giren kütle debisi
$\dot{m}_{\zeta}$	Çıkan kütle debisi
v	Hız
A_{abs}	Emici yüzey alanı
E_{gkol}	Kolektöre giren enerji
$E_{kullanılan_{kol}}$	Kolektörde kullanılan
$\eta_{th_{kol}}$	Kolektör verimi
c_p	Özgül ısı kapasitesi
τ	Cam yüzeyin geçirgenliği
α	Emicilik katsayısı
R	Radyasyon
T_{ζ}	Çıkış sıcaklığı
T_g	Giriş sıcaklığı
$X_{\zeta_{kol}}$	Kolektör çıkış exerjisi
$X_{g_{kol}}$	Kolektör giriş exerjisi
$T_{\zeta_{evre}}$	Çevre sıcaklığı
$T_{güneş}$	Güneş sıcaklığı
$X_{kayıp_{kol}}$	Kolektör kaybı
E_{epv}	PV elektriksel güç
η_e	Elektriksel verim
η_{X_e}	Elektriksel ekserji verimi
V_{oc}	Açık devre gerilimi

Simgeler**Açıklamalar**

I_{SC}	Kısa devre akımı
I_{max}	Maksimum akım
$\dot{m}_a$	Havanın kütleli debisi
V_{max}	Maksimum gerilim
$\dot{m}_{gKO}$	Kurutma odasına giren kütle debisi
$\dot{m}_{\zeta KO}$	Kurutma odasından çıkan kütle debisi
$\dot{E}_{gKO}$	Kurutma odasına giren enerji
$\dot{E}_{\zeta KO}$	Kurutma odasından çıkan enerji
MC	Nem içeriği
$X_{\zeta KO}$	Kurutma odasından çıkan ekserji
X_{gKO}	Kurutma odasına giren ekserji
$X_{kayıp KO}$	Kurutma odası kaybedilen ekserji
h	Entalpi
V_{ζ}	Çıkan hız
V_g	Giren hız
W	Güç

Kısaltmalar**Açıklamalar**

COP	Etkinlik katsayısı
FF	Doldurma faktörü
PV	Fotovoltaik panel
PVT	Fotovoltaik ısı kolektör
SI	Sürdürülebilirlik indeksi
WER	Ekserji yıkımı
MC	Nem içeriği
MODEL_1	V-oluklu tipi standart kolektör
MODEL_2	V-oluklu tipi termal enerji depolamalı kolektör

1. GİRİŞ

Dünya çapında nüfus artışı, oluşan enerji krizlerinin en temel kaynağıdır. İnsanlığın devamı için en temel olgu olan besin kaynakları, artan nüfus ile yetersiz kalmakta ve farklı sorunlar teşkil etmektedir. Bu bağlamda enerji krizi ortaya çıkmakta ve yaşam kalitesinin azalmasına neden olmaktadır. Yaşam kalitesini etkileyen ana faktörlerden biri besinlere ulaşım problemleridir. Nüfus artışı ile besinlere ulaşım zorlukları yaşanmakta ve kriz durumları ortaya çıkmaktadır. Bunun yanı sıra yaşam kalitesini etkileyen diğer bir faktör de farklı mevsimlerde ortaya çıkan besinlere ulaşım sorunudur. Yaşam kalitesini arttırmak amacıyla mevsimsel besinlerin daha sonra tüketimi için günümüzde pek çok işlem uygulanmaktadır. Bu işlemler sonucunda da besinin hem zarar görmesi hem de besin değerlerinin azalması ana problemlerdendir.

Gelişmiş ülkeler sürdürülebilir bir enerji ve gelecek oluşturmak amacıyla nüfus ile gıda arzı arasındaki dengeyi sağlayarak tarım sonrası gıda kayıplarını minimum seviyeye indirmek için modern tarım ve modern depolamadan yararlanıyor. Buna karşın gelişmemiş veya gelişmekte olan ülkelere bu seviyeye henüz ulaşamadığından gıdaya ulaşmak için talepler yeteri kadar karşılanamamaktadır. Buna bağlı olarak besinlerin ömrü, odak noktası haline gelmiştir.

Güncel olarak besinlerin ömrünü uzatmak ve elde edilmesi mümkün olmadığı mevsim şartlarında da ulaşmak amacıyla pek çok uygulama yapılmaktadır. Besin değerleri dikkate alınarak yapılan saklama yöntemlerinin en popüler olanlarından biri olan kurutma işlemi hem besinlerin raf ömrü uzun hem de besin değerleri korunmuş bir şekilde saklanmasını sağlamaktadır. Geçmişten günümüze pek çok yöntemle yapılan bu kurutma işlemi hayat standartlarını artırmak için büyük önem teşkil etmektedir. Teknolojik gelişmelerin artışı ile birlikte mevsimsel besin ürünlerinin sentetik yollar ile üretiminin yanı sıra kurutma işlemi ile daha kaliteli ve daha sağlıklı besinlerin tüketilmesi mümkündür.

Kurutma, herhangi bir besinin içerisindeki nemin uzaklaştırılması mantığına dayanan bir prosestir. Bu anlamda pek çok kurutma yöntemi geçmişten günümüze kadar farklı yöntemlerle gelmiştir. Kurutma ile besin tüketimi ilkel çağlarda keşfedilmiş olup günümüze kadar çeşitli yöntemlerle devam etmiştir. Önceki zamanlarda güneş enerjisinin ısısından faydalanarak kullanılan kurutma günümüzde yerini sadece güneş enerjisi değil çeşitli enerji

kaynaklarıyla devam ettirmiştir. Kurutma için gerekli olan ısı enerjisi farklı yenilenebilir enerji kaynaklarından ya da fosil yakıtlardan sağlanır ancak fosil yakıtların çevreye verdiği kirlilik, ekonomik boyutu ve zorlu tedarik süreçlerinden dolayı yenilenebilir enerjiye göre tercih edilmeme sebeplerindendir. Kurutmada rüzgâr enerjisi, biyokütle enerjisi, jeotermal enerji gibi farklı enerji kaynakları kullanılıyor olsa da bunlardan en fazla tercih edilen enerji kaynağı genellikle güneş enerjisidir.

Güneş enerjisi ile kurutma işleminde birden fazla yöntem kullanılabilir. Kurutulacak olan ürünü doğrudan güneş enerjisinden gelen ısıнын etkisine bırakarak veya güneş ile ısıtılan havayı doğal ya da zorlanmış yöntemler ile ürüne ileterek kurutma gerçekleşir. Güneş enerjisini ısı enerjisine dönüştürmede kolektörler kullanılmaktadır. Bu kolektörler havalı ve sıvılı kolektörler olarak 2'ye ayrılır. Sıvılı güneş kolektörler güneşten gelen enerjiyi, kullanılan sıvıya ısı enerjisi olarak aktarır. Genel olarak su ısıtma işlemlerinde kullanılmaktadır. Havalı kolektörler ise kolektörde yer alan yutucu yüzey ile güneşten gelen ışınları tutarak ve bu tuttuğu ışınları ısı enerjisine çevirerek havaya aktaran kolektörlerdir. Ürünlerin kurutulmasında da havalı güneş kolektörleri kullanılmaktadır. Fotovoltaik destekli güneş enerjili kurutucu ise kurutmanın yanında, üzerinde bulunan fotovoltaik paneller yardımı ile ihtiyacı olan elektriği güneş enerjisi tarafından tedarik etmektedir. Böylece kullanılacak olan elektrik maliyeti minimuma düşmektedir. Güneş enerjisinden faydalanılarak gerçekleştirilen kurutma yönteminin yanı sıra, vakumlu kurutma, dondurma işlemi ile kurutma, konveyörlü kurutma, tünel ile kurutma gibi çeşitli yöntemlerle de kurutma gerçekleştirilebilmektedir.

Isıl kurutma işlemleri çeşitli tahminlere göre, gelişmiş ülkelerde ulusal sanayi enerjisinin %10-25'ini tüketerek, neredeyse tüm endüstriyel sektörlerde bulunduğu bilinmektedir. Dünya çapında gelişen ekonomi ile hızlı endüstrileşme, ısıl kurutma için enerji tüketimi, zamanla kaçınılmaz olarak artacak olan sera gazları salınımının olumsuz çevresel etkisi ile sonuçlanmaktadır. Yoğun enerji endüstrisindeki bu baskı, verimli enerji teknolojileri ve daha az enerji tüketim yolları bulma arayışına neden olmaktadır. Yoğun enerjili işlemlerden biri olan kurutma için endüstriyel kurutuculardaki enerji tüketimi çok büyüktür ve bu birim işlem maliyetlerine dönüşmektedir. Bu büyüyen sorun için en etkili çözümü geliştirmek ve yüksek enerji verimliliğine sahip teknolojiler geliştirmek, net enerji tüketimini azaltacak ve çevresel etkilerini hafifletecektir. Genellikle geleneksel kurutucular, zayıf dizayn ve temel kurutma bilgisi eksikliği nedeniyle 3 düşük enerji verimliliği ile çalıştırılır. Dahası bu kurutucular

enerji maliyetinin bol ve ucuz olduğu zamanda tasarlanmıştır. Günümüzde senaryo tamamen değişmiştir; enerji maliyeti, sadece ekonomi bakış açısıyla değil aynı zamanda çevresel etki açısından da önemli bir konu haline gelmiştir [1].

Bu çalışmada termal enerji depolama ünitesinin fotovoltai  termal kurutucuların performansı üzerindeki etkisi araştırılmış ve bu etkinin incelenmesi amacıyla deneysel analiz gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta V-oluk tipi geleneksel bir fotovoltai  termal kurutucu üretilmiştir. Daha sonra fotovoltai  hücreye termal enerji depolama  nitesi entegre edilmiş ve termal enerji depolama ünitesinin kurutma sisteminin performansına etkisi araştırılmıştır. Eşdeğer zaman aralıklarında ürün kütlesi, kolektör hava giriş-çıkış sıcaklığı ve hava debisi gibi parametrelerin incelendiği bu çalışmada hem kolektörün hem de kurutma ünitesinin enerji, ekserji, sürdürülebilirlik indeksi (SI) ve atık ekserji oranı (WER) gibi performans parametreleri paylaşılmıştır.



2. GÜNEŞ ENERJİSİ

Evrendeki en büyük gezegenlerden biri olan Güneş, 1.39×10^9 m çapındadır. Yaklaşık uzaklığı 1.5×10^{11} m olup güneşten ayrılan güneş ışını yaklaşık olarak 8 dakika 30 saniye sonra Dünya'ya varmaktadır. Güneş içerisinde sayısız patlamalar meydana gelmektedir ve sıcaklığı çok yüksektir. Güneşin çekirdek sıcaklığı yaklaşık olarak 8×10^6 K ile 40×10^6 K arasındadır. Dünyada kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından en sık tercih edileni güneş enerjisidir bunun başlıca sebepleri arasında sürekli bir enerji kaynağı olması, temiz olması çevreye zararlı atık gazlar ya da buna benzer atık maddeler yaymaması, kolaylıkla ulaşılabilir olması gibi çeşitli avantajlarından dolayı sıkça tercih edilip kullanılmaktadır. Ayrıca güneş enerjisi elektrik üretiminin yanı sıra sıcak su temini, kurutma, aydınlatma, tarım gibi farklı alanlarda da avantaj sağlamaktadır. Ülkemizde ve Dünyada teknolojinin yükselen ivmesi sayesinde güneş enerjisinden faydalanma hali de artmaktadır. Bu alanda yapılan ekonomik yatırımlar ve devlet desteği güneş enerjisine olan ilgiyi artırmakta ve kullanım açısından önünü açmaktadır [2].

Yenilenebilir enerji kaynakları kurulum, maliyet ve kullanım açısından incelendiğinde, güneş enerjisinin, yenilenebilir enerji kaynakları tercihinde en temiz ve en kolay seçeneklerin başında geldiği görülmektedir. Güneş ışınımının kullanılabilir biçime dönüştürülmesi; güneş-termal, güneş-fotovoltaik ve güneş mimarisi yöntemleri ile sağlanmaktadır [3].

Güneş enerjisi, herhangi bir yanma ürünü çıkartmamaktadır ve iletişim teknolojisinde kullanılan malzemeler haricinde çevreye olumsuz bir etkisi bulunmamaktadır. Güneş kaynaklı enerjiden ısıtma amaçlı faydalanmak olanaklı olup, elde edilen ısıdan açığa çıkan su buharından elektrik enerjisi üretilebileceği gibi direkt olarak güneş ışınlarından elektrik enerjisi üretimi de yapılabilir [4]. Aynı zamanda bu enerjiden açığa çıkan ısı ile farklı doğal kurutma yöntemleriyle faydalanılabilmektedir.

2.1. Fotovoltaik ve Termal Fotovoltaik Paneller

Fotovoltaik hücreler her biri belirli bir amaca ait olan farklı katmanlardan oluşmaktadır. Fotovoltaik panellerde bulunan en önemli katman ise özel olarak üretilmiş olan yarı iletken katmandır. Bahse konu olan iki farklı katman ise P tipi ve N tipi katmanlardır. Fotovoltaik

paneller temelde güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren modüllerdir. Temiz, faydalı, gürültüsüz çalışma gibi özellikleri başlıca tercih edilme sebeplerindendir. Termal fotovoltaik panel (PVT) kullanımındaki temel amaç hem panel yüzeyindeki ısınmayı önleyerek elektriksel performansı artırmak hem de panel yüzeyinde oluşan sıcaklığı akışkan bir madde yoluyla ısıya çevirmek. Termal fotovoltaik paneller hem elektronları hem de fotonları etkili bir şekilde toplayabilmesi adına saydam bir termal depolama ünitesi entegre edilmiştir. Termal fotovoltaik paneller genellikle akışkan su ya da olan kolektör ile entegre edilmiş halde kullanılmaktadır. Bu noktada kolektör genel verimini de dolaylı olarak etkilemektedir.

2.2. Güneş Kolektörleri

Güneş kolektörleri güneşten gelen ışınlamaları emici plaka aracılığıyla faydalı enerjiye dönüştüren, enerji dönüşüm sistemleridir. Temel çalışma prensibi güneş ışınlamalarını emici plakada absorbe ederek hava, yağ, su gibi akışkanlara aktarmak olan bu sistemler, geçmişten günümüze kadar farklı modellerle kullanılıp aynı zamanda geliştirilen özel ısı değiştiricileridir. Güneş kolektörleri temelde iki farklı model olarak bulunmaktadır. Bunlar Sabit güneş kolektörleri (odaklanamayan) ve odaklanabilen (yoğunlaştırıcı) olarak iki farklı sistem olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca bu iki farklı kolektörde kendi içerisinde de farklı amaçlara göre farklı tiplerde kolektör barındırırlar. Ülkemiz güneş enerjisinden faydalanma açısından önemli bir konuma sahip olduğundan ve giderek artan teknoloji sayesinde bu gibi sistemlerle birlikte güneş enerjisinden yararlanma oranı da zamanla artmaktadır.

2.2.1. Sabit güneş kolektörleri

Sabit güneş kolektörleri güneş takibi yapmayan, düz bir saydam örtüye sahip olup aynı zamanda güneşi bir noktaya odaklamayan direk olarak güneşin kendi enerjisinden faydalanan kolektör çeşididir.

Başlıca sabit kolektör çeşitleri şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Düzlemsel güneş kolektörleri
- Parabolik güneş kolektörleri
- Vakumlanmış güneş kolektörleri

Düzlemsel güneş kolektörleri

Güneş kolektörlerinden başlıca kullanılan düzlemsel güneş kolektörlerinin çalışma prensibi güneş ışınımının kolektör üzerinde yüksek enerji tutuculuğuna sahip emici bölüme gelmesi ve burada yutulan enerjinin akışkana transfer edilmesi prensibine göre gerçekleşir. Yutucu bölümün geneli koyu renkte olmaktadır ayrıca siyah olması, emiciliği artıracığından dolayı akışkana daha verimli bir ısı transferi sağlar. Kolektörün alt ve yan yüzeylerinden gerçekleşmesi muhtemel ısı kayıplarını azaltmak amacıyla ise farklı yalıtım ürünleriyle bu yüzeyler kaplanır. Aynı zamanda genellikle sabit olarak pozisyonlandırılan düzlemsel güneş kolektörü, güneş ışınımına maksimum seviyede maruz kalıp gereken enerji miktarını alabilmek amacıyla kolektörün güneş ışınlarını dik olarak alacak şekilde yerleştirilmesi önem arz etmektedir aksi takdirde verimde düşüş gözlemlenecektir. Verimin etkileyebilecek diğer hususlar ise şu şekilde sıralanabilir; Saydam örtünün ısı geçirgenliğinin düşük olması, güneş enerjisinin o bölge için yetersiz olması, yutucu yüzeyin ısı iletim değeri, yalıtım malzemesinin kalınlığı, dış ortam sıcaklığı gibi durumlar verimi etkiler.

Düzlemsel güneş kolektörleri temel anlamda;

- Saydam örtü(yüzey)
- Yutucu yüzey
- Yalıtım (kaplama) malzemesi
- Akışkan taşıyıcı borular
- Kolektör kasası

Olmak üzere 5 temel bölümden oluşmaktadır.

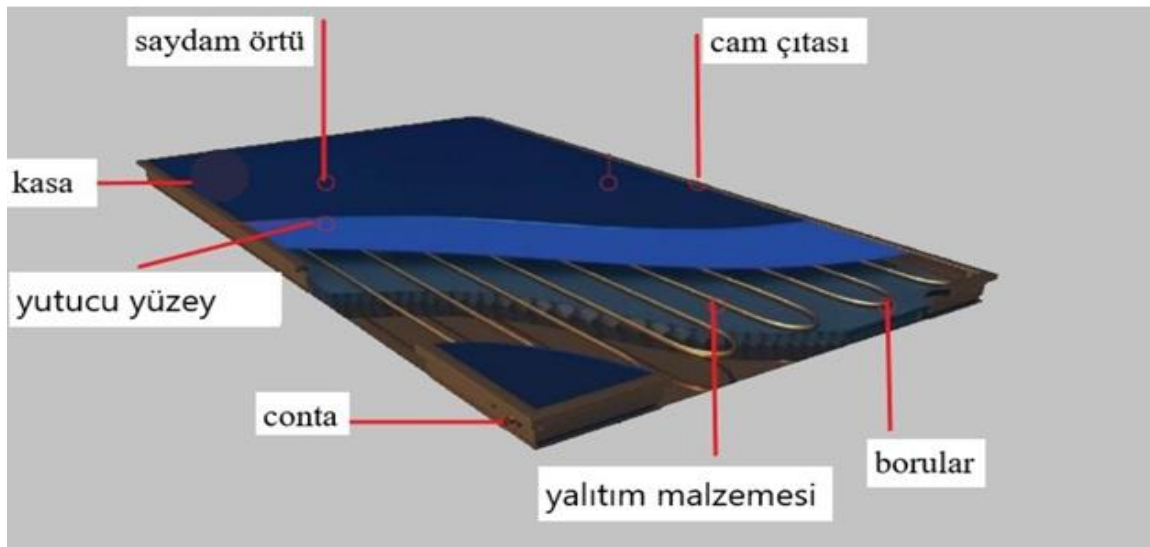
Saydam yüzey, kolektöre gelebilecek zararlı çevresel etkilerden (dolu, yağmur, toz vs.) korur. Bu yüzey sayesinde güneşten gelen ışınımın büyük bir kısmı bu bölümde tutulur aynı zamanda üst bölümde oluşabilecek ısı kayıplarını da engeller. Kolektör kasalarında genellikle cam tercih edilir sebebi ise yüksek ışınım tutma oranı, kısa dalga boylu ışınımın geçirme durumu camı öncelikli hale getirmiştir. Bunun yanı sıra plastik malzemelerde kullanılabilir fakat plastik malzemelerin hafiflik, esneklik gibi avantajlarının yanı sıra güneş ışını karşısındaki dayanıksızlığı, ışınım tutma oranı ve dalga boyu gibi dezavantajlarından dolayı pek tercih edilmemektedir.

Yutucu yüzey, yutucu yüzeyler ısı iletkenliği ve ışı nımı tutma oranı yüksek malzemelerden seçilir. Ayrıca bu yüzeyler siyah boya ile boyanarak ısı iletkenlik değ eri büyük değ erlere getirilmeye çalışılır. Seçilen malzemelerin geometrik yapısına, çeşidine (sac, alüminyum, çelik vs.) dikkat edilir. Bununla birlikte yüzeyin dayanıklı ve korozyona da uğ ramaması beklenir böylelikle kolektör verimi de ideal aralıkta tutulur [5].

Yalıtım(kaplama) malzemesi toplayıcıdaki yalıtımı sağlar. Oluşabilecek enerji kayıplarını ortadan kaldırmak amacıyla kullanılır. Yalıtım malzemesi olarak cam yünü, poliüretan köpük tarzında malzemeler kullanılmaktadır. Ayrıca kolektör içerisinde doğabilecek ısı kayıplarını engellemek ve yüzeye geri yansıtmak amacıyla alüminyum kaplı cam yünü de kullanılabilir.

Akışkan taşıyıcı borular, kolektör yüzeyine güneşten gelen enerji yutucu yüzeyde absorbe edildikten sonra enerjinin bir kısmı akışkan taşıyıcı borulara aktarılırken bir kısmı ise toplayıcıda depolanır. Bu noktada akışkan taşıyıcı borularda ısı iletkenliğine dikkat edilmelidir. Ayrıca korozyon, paslanma vb. gibi olumsuz durumlara karşı, borular dikkatli seçilmelidir.

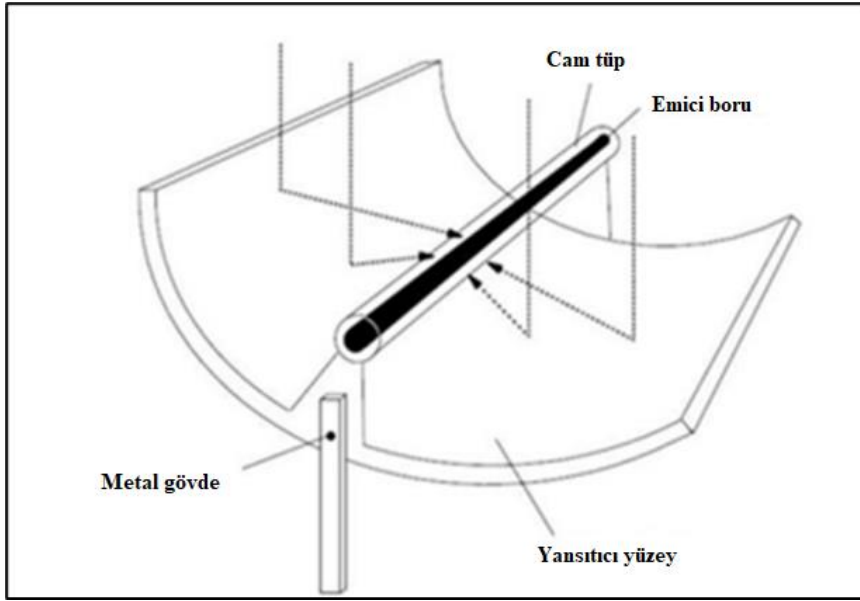
Kolektör kasası, kolektör kasaları amaçlarına göre değ işiklik göstermekle birlikte alüminyum, plastik, çelik vb. farklı malzemeler yapımı aşamasında kullanılabilir. Malzemelerin dayanımları, ısı iletkenlikleri, maliyetleri, sızdırmazlıkları göz önünde bulundurularak ideal seçimler yapılabilir.



Resim 2.1. Düzlemsel güneş kolektörü görünüşü [6]

Parabolik güneş kolektörleri

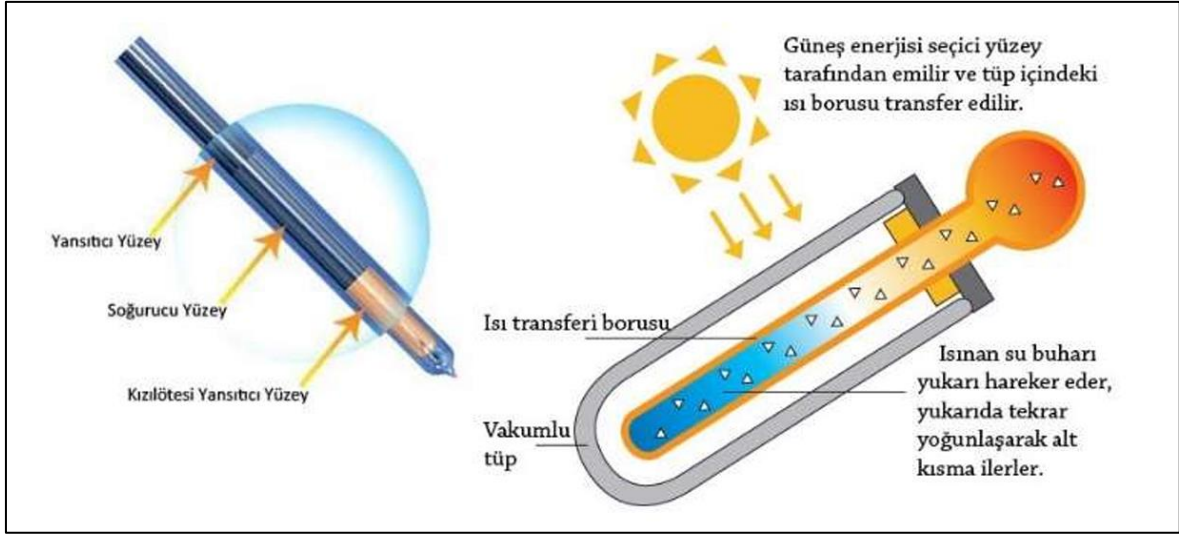
Bu tip kolektörler parabolik yansıtıcı bir yüzeye sahiptir böylelikle kolektör üzerine düşen güneş enerjisinin büyük bir bölümünü cam tüp içerisinde bulunan siyah emici boruya aktarır bu vasıta ile da enerjisini akışkana aktarmaktadır. Kolektörler genellikle güneşin doğudan batıya doğru hareketini izleyebilecek şekilde yerleştirilirler. Parabolik şekli sayesinde bu sistemler yaklaşık 400°C gibi değerlere ulaşabilmektedir.



Resim 2.2. Parabolik güneş kolektörü [7]

Vakumlu güneş kolektörleri

Vakumlanmış güneş kolektörleri, vakumlu tüpün içerisine yerleştirilmiş olan ısı transfer borusuyla oluşan bir sistemdir. Sistem içerisinde daha verimli bir ısı transferi oluşturulmak istenirse içeride farklı tip yansıtıcılar kullanılarak ısı transfer borusunun absorban yüzeyine gelen enerji miktarı arttırılabilir. Resim 1.3'te gösterilen vakumlu tüplü kolektörde ısınan akışkan depoya doğru hareket ederken depo içerisinde bulunan soğumuş olan akışkan ise tekrar vakumlu tüpün içerisine doğru hareket eder. Kolektörün içerisi vakumlanmış olduğundan dolayı iletimle veya taşınım ile herhangi bir ısı transferi gerçekleşmez [8].



Resim 2.3. Vakum tüplü güneş kolektörü [9]

2.2.2. Odaklanabilen güneş kolektörleri

Odaklanabilen güneş kolektörleri yapı olarak genel olarak iç bükey bir şekildedir. Bu iç bükey yani konkav yapısı sayesinde güneş ışınımı belirli bir noktada odaklayabilir. Odaklama işlemiyle birlikte belirli bir alan içerisinde yoğunlaşan güneş ışını yüksek miktarda bir sıcaklık artışının ortaya çıkmasına olanak sağlar. Bu işlem güneşten gelen ışınım ile enerji emici yüzey arasına optik bir malzeme konularak sağlanır [3].

Odaklanabilen güneş kolektörlerinin diğer kolektörlere göre bazı avantajları ve dezavantajları vardır. Avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Sistem yapısı itibarıyla daha fazla sıcaklık elde edebildiğinden dolayı yapılan çalışmalar nezdinde de daha fazla ısı verim elde edilebilir.
- Diğer kolektörlere nazaran daha düşük bir ısı kaybı mevcuttur.
- Sistem basit bir yapıya sahiptir. Bu sayede hem daha az malzeme ihtiyaç duyulur hem de ekonomik maliyet daha düşüktür.

Dezavantajları ise şöyledir:

- Yansıtıcı yüzeylerin periyodik olarak bakıma ve temizliğe ihtiyacı vardır aksi halde yansıtıcı yüzeyler zaman içerisinde özelliklerini kaybederler.
- Güneş takibi olan sistemlere ihtiyaç duymaktadırlar.

- Odaklama sistemleri, odaklama oranına bağı olarak az yayılmış radyasyonları toplamaktadır [2].

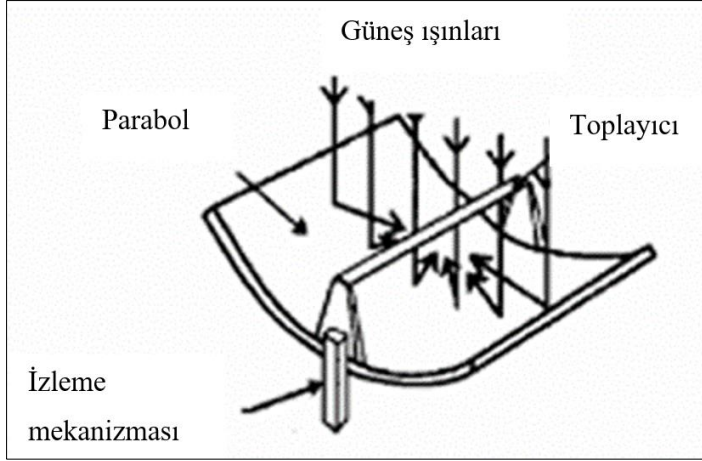
Odaklanabilen güneş kolektörleri farklı yansıtıcı yüzeylere farklı toplayıcılara göre çeşitli şekillerde modellere sahiptir bunlar:

- Parabolik çanak
- Lineer fresnel reflektör
- Parabolik çukur toplayıcı
- Merkezi alıcı [10]

Parabolik çanak kolektörler

Parabolik çanak kolektörler, yüksek ısı miktarı ve buna bağı olarak yüksek verim elde etmek amacıyla kullanılan kolektör çeşitlerinden biridir. Genellikle elektrik üretmek amacıyla kullanılırlar. Bu tip sistemler güneş takibi yapabilmekte böylece güneş enerjisinden daha fazla yararlanılmakta ve verimliliği artmaktadır.

Parabolik yüzey, yansıtıcı yüzeyin iç bükey bir hale getirilmesiyle elde edilir. Çanak kolektörün resim 2.4'te görüldüğü gibi odak noktasında bir toplayıcı mevcuttur ışınlar bu noktada toplanır. Toplayıcıda ısı kayıplarını azaltmak amacıyla cam bir örtü bulunur. Toplayıcıda toplanan enerji, akışkana enerjisini aktararak ısı uygulamalarda kullanılabilir. Bunun yanı sıra gerekli güç sistemleri parabolik çanak kolektör sistemine entegre edildikten sonra elde edilmiş olan mekanik enerji elektrik enerjisine çevrilebilir [2].



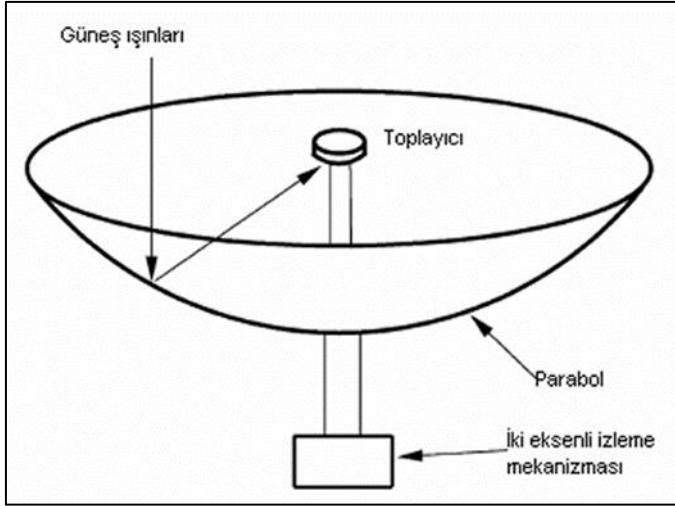
Resim 2.4. Parabolik çanak tipi kolektör [2]

Lineer fresnel reflektör

Bu tip kolektörler güneşi iki ekseninde izleyebilirler bu izleme sayesinde güneş ışınından yararlanma oranı da artar. Resim 1.6, bu tip kolektörü göstermektedir resimde görüldüğü gibi parabolik olarak şekillenmiş bir çukur toplayıcı sistemi var olup yüzeyin merkez noktasında ise toplayıcı yer almaktadır. Parabolik çukur toplayıcı sisteminde toplayıcının güneş ışınlarını kolektör yüzeyinde her alana dağıtmasından dolayı yaklaşık olarak 1500 °C sıcaklıklara ulaşabilir.

Parabolik çukur toplayıcı tip kolektörün farklı avantajları da bulunmaktadır bunlar

- Diğer tüm kolektör çeşitlerine göre yapısı itibariyle güneşe daha fazla odaklandıkların dolayı daha fazla verime sahiptirler.
- Bu tip kolektörlerin yoğunlaştırıcı oranı başka bir deyişle toplayıcı üzerine daha fazla güneş ışını gelmesinden dolayı yüksek verimli ısı enerjisi ve güç değişim sistemine sahiptirler.
- Bu tip kolektörler sistemin bağımsız fonksiyon ya da tüm kolektör sisteminin bir parçası şeklinde modüler kolektör ve alıcı parçalarına sahiptirler [2].



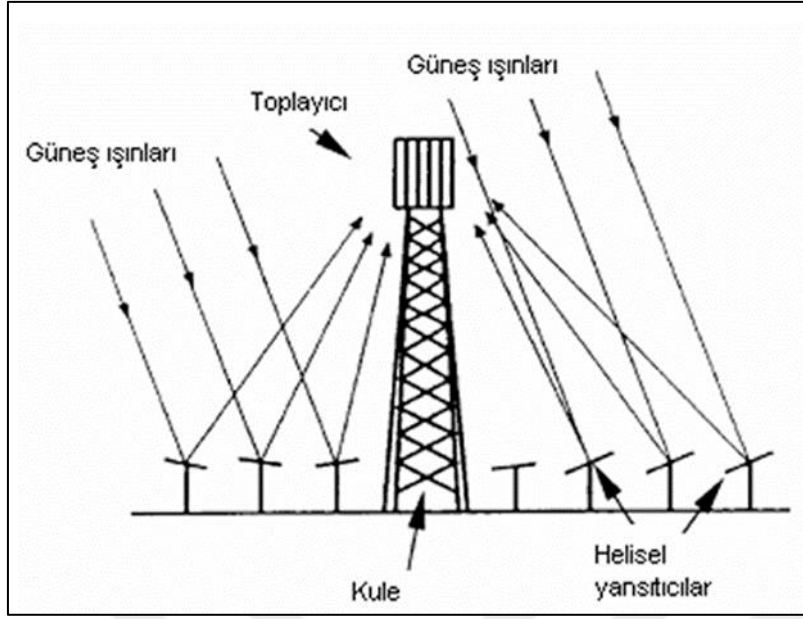
Resim 2.5. Parabolik çukur toplayıcı tip kolektör

Merkezi alıcı (helisel alan) kolektörler

Bu tip kolektörler yüksek enerjili sistemlerdir. Helisel yansıtıcılar çok sayıda, küçük bir açıya sahip konkav yapıları aynalardan oluşabilmektedir. Sistemde bulunan helisel yansıtıcılara güneş ışınları belirli bir açıyla gelerek, kule üzerinde sabit duran toplayıcıya yansıtılır. Toplayıcının ısı transfer katsayısı yüksek malzemelerden oluşması, verim artışı sağlamaktadır. Toplayıcıya yansıtılan ışınlar burada absorbe edildikten sonra, içerisinde bulunan akışkan borulara ısı enerjisini aktarır [2].

Merkezi alıcı güneş kolektörleri birkaç avantaja sahiptir:

- Enerji depolama özelliği yüksek olan sistemlerdir.
- Diğer kolektörlere nazaran oldukça büyük bir yapıya sahiplerdir, böylece bünyesinde büyük güçler üretebilmektedir.
- Yansıtıcılar, ışınları doğrudan toplayıcıya ilettiği için düşük miktarda termal enerjiyle enerji iletim işlemini gerçekleştirebilirler [2].



Resim 2.6. Merkezi alıcı (helisel alan) kolektörler

3. KURUTMA

Kurutma, en basit ifadeyle kurutulmak istenen maddenin içerisindeki sıvının çekilmesi işlemidir. İnsanlığın varoluşundan günümüze kadar geçen süre içerisinde, hayatı idame ettirmek adına gıdaların kurutulması yöntemi sıklıkla kullanılmıştır. Eski çağlarda yalnızca doğal kurutmadan faydalanılırken, teknolojinin gelişmesiyle birlikte kurutma yöntemlerinde farklı teknikler geliştirilmeye başlanmıştır. Bu gelişme sadece gıda nezdinde değil, farklı sanayi dallarında da kurutma ihtiyacının olmasından dolayı kaynaklanmıştır.

Kurutmada zamanla çeşitli kurutma yöntemlerinin ortaya çıkmasında ve tercih edilmesinde farklı sebepler bulunmaktadır; harcanılan zaman, harcanılan enerji, verimlilik, maliyet gibi farklı etmenler bu gibi farklı yöntemlerin ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır. Tarım alanında da kurutma sıklıkla kullanılmaktadır bunların başlıca sebepleri; kurutma sonrasında maddenin hacminin küçülmesi depolama ve taşıma maliyetlerini de düşmesi, kurutulmuş ürünün uzun süre besin değerlerini kaybetmeden muhafaza edilmesi, kuru meyve ve sebzelerin yaş meyve ve sebzelere göre ekonomik olarak oldukça avantajlı olması başlıca tercih edilme sebeplerindendir [11].

Kurutma teknik olarak, maddenin içerisinde bulunan nemin aynı anda hem ısı hem de kütle yoluyla çekilmesi işlemidir. Bu nemin çekilmesinde genellikle hava kullanılmaktadır. Kurutma havası olarak adlandırdığımız hava, maddenin içerisindeki nemi uzaklaştırmak amacıyla maddeye ısı akışı oluştururken, maddeden de kurutma havasına bir nem geçişi olmaktadır. Bu işlemin başarılı bir şekilde tamamlanması için kurutmaya konu olan maddenin içerisindeki sıvı miktarının gerekli kurutma seviyesine gelene dek buharlaşması gerekmektedir [11].

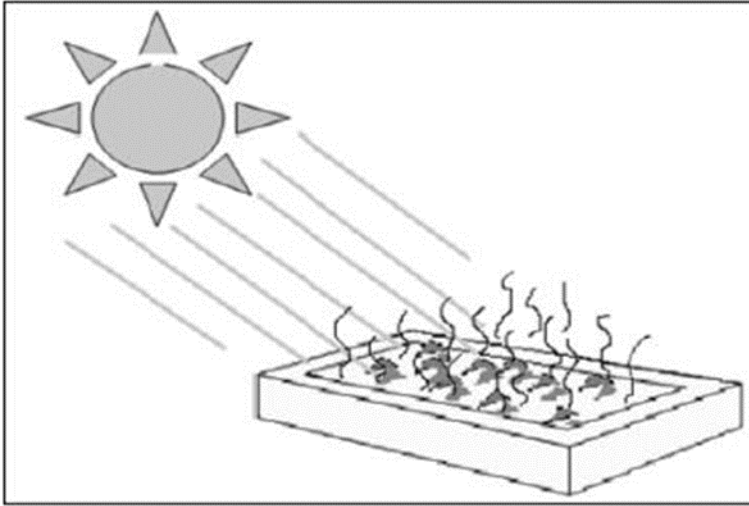
Kurutmanın temelde iki farklı yöntemi bulunmaktadır; doğal kurutma ve yapay kurutma. Bu iki farklı kurutma çeşidi de kendi içerisinde farklı karakteristikteki kurutma çeşitlerine göre ayrılmaktadır. Kurutma için seçim yapılırken kurutma işlemi yapılacak olan maddenin özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca kurutucu özellikleri de kendi aralarında zaman, enerji verimliliği, maliyet gibi konular göz önünde bulundurularak karşılaştırılmalıdır. Bu karşılaştırmaların ışığında en uygun ve en verimli kurutucu seçimi yapılmalıdır [12].

3.1. Doğal Kurutma

Doğal kurutma insanlık tarihinde bilinen ve uygulanan en eski kurutma yöntemlerinden biridir. Bu yöntemin temelini ise güneşin sıcaklığı oluşturmaktadır. İstenilen sıcaklık meydana gelince ürün içerisinde sıvı miktarı üründen uzaklaştırılarak kurutma gerçekleştirilmiş olur. Bu tip bir kurutma doğal bir yöntem olup yalnızca güneşin enerjisinden faydalandığı için herhangi bir sistem gereksinimine ihtiyaç duymaz aynı zamanda enerji maliyeti de yoktur. Doğal kurutmada yalnızca güneşin kullanılması gibi avantajlı bir durum olmasına rağmen çeşitli dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar;

- Isının kaynağı olan güneşin her zaman ve her yerde mevcut olmaması.
- Beklenmedik ve kurutmaya zararlı iklim şartlarının olması rüzgâr, toz vb.
- Kurutma yalnızca doğal koşullara bağlı olduğundan dolayı kurutulacak olan maddeden istenilen seviyede nemin çekilememesi ve gerekli kurutmanın oluşmaması.
- Kurutmanın çok yavaş gerçekleşmesinden dolayı kurutma için geçen zaman oldukça fazladır.
- Her ürünün ya da maddenin güneşte kurutulması mümkün değildir.
- Kurutma yapılabilmesi için geniş alanlara ihtiyaç vardır bu durum yüksek işçilik gerektirir böylece olumsuz ekonomik sonuçlar ortaya çıkar [13].

Doğal kurutma güneşin bulunduğu ortam haricinde gölgede de gerçekleşebilir uygun sıcaklık şartları oluşup, maddenin havayla ısı transferini gerçekleştirmesiyle birlikte gölgede de doğal kurutma gerçekleşebilir.



Resim 3.1. Doğal kurutma sistemi [13]

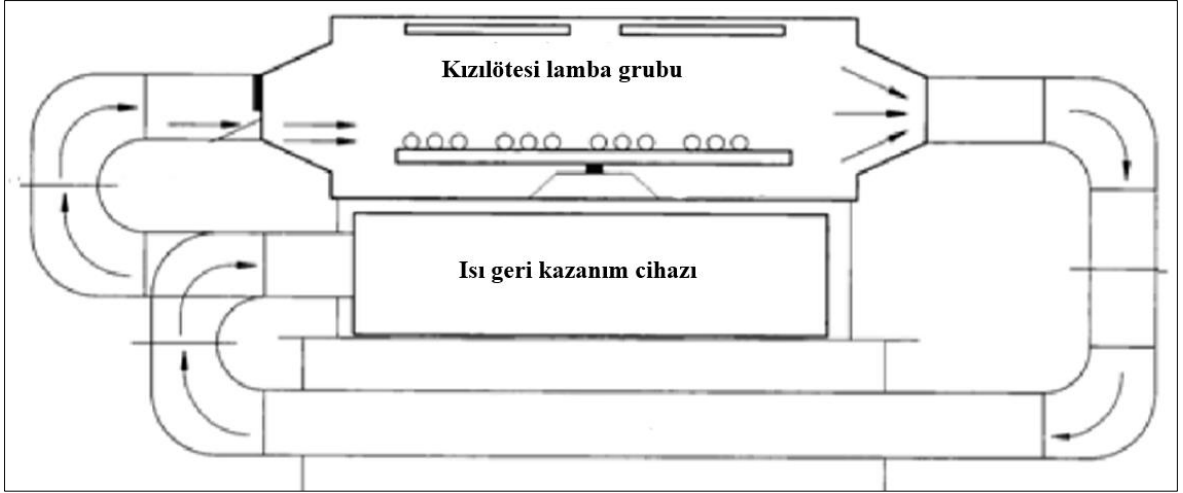
3.2. Yapay Kurutma

Kurutma sistemlerinin kullanıldığı ilk çağlardan günümüze dek gelişen teknoloji ve değişen ihtiyaçlar doğrultusunda farklı kurutma tasarımlarına bağlı çeşitli kurutma sistemleri ortaya çıkmıştır. Günümüzde kurutma ürünlerinin karakteristik özellikleri doğrultusunda gereken ısı, basınç vb. farklı özelliklere bağlı olarak çeşitli kurutma sistemleri ön plana çıkmaktadır. Bu kurutma sistemleri, kurutulacak olan maddenin istenilen seviyede nem çekilmesi, istenilen zamanda kurutulması, istenilen hacimde ve boyutta kurutulması gibi farklı parametrelere göre tercih edilmektedir. Bu bağlamda farklı yapıda ve tarzda yapay kurutma çeşitleri ve kurutucu sistemleri ortaya çıkmıştır.

3.2.1. Kızılötesi ışınlı (Infrared) kurutma

Kızılötesi ışınlı kurutmada kızılötesi ışınlı ve ısı sağlayan gaz ısıtmalı, akkor lambalar, kızılötesi lambalar, buhar ısıtmalı kaynaklar, elektrikle ısıtılmış yüzeyler gibi farklı metotlar kullanılmaktadır. Bu sistemin tercih edilmesinin başlıca sebepleri arasında kurutulacak ürünü çabuk ısıtması buna bağlı olarak kurutma zamanından tasarruf edilmesi ayrıca hızlı bir şekilde kurutmayı gerçekleştirmesine rağmen ürüne en az seviyede zarar vermesi kızılötesi ışınlı kurutmayı ön plana çıkarmaktadır [14].

Resim 3.2’de kızılötesi lamba gruplu ve buna ek olarak ısı geri kazanım cihazıyla desteklenen bir kızılötesi ışınlı kurutma sistemi gösterilmiştir.



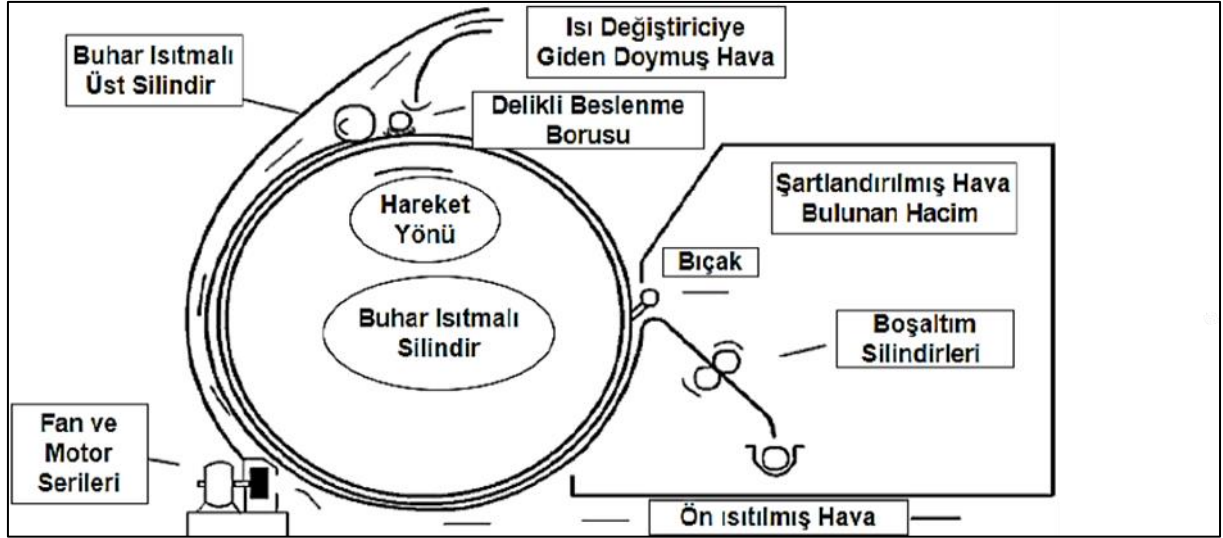
Resim 3.2. Kızılötesi ışımlı (Infrared) kurutma sistemi [15]

3.2.2. Morötesi radyasyon kurutma

Morötesi radyasyon kurutmada adından da anlaşılacağı üzere kurutma için gerekli olan ısı enerjisi elektromanyetik ışınlar kullanılarak gerçekleştirilir. Morötesi radyasyon kurutmada ısıtma için uygulanan enerji direk olarak ürüne değil elektromanyetik dalgaları absorbe etmek amacıyla konulan yüzeye ısı transferini iletir buradan da ürüne yüksek miktarda ısı sağlar böylece ürünün içerisindeki nem istenildiği kadar ve istenilen süre içerisinde çekilebilir. Bu durum oldukça avantajlıdır.

3.2.3. İletimle kurutma

İletimle kurutma yönteminde kurutulacak olan madde için gerekli olan ısı enerjisi, ısıtılmış olan yüzeylerden maddeye doğru iletimle ısı transferi yoluyla gerçekleşir. Kapalı bir sistem olmasından dolayı atıklar, zararlı gazlar gibi maddelerin doğaya salınımı gerçekleşmez ve çevreyi kirletmez. Diğer kurutma yöntemlerine göre enerji verimi yaklaşık olarak %50 daha fazladır [16].



Resim 3.3. İletimle kurutma sistemi [16]

3.2.4. Dondurarak (Şoklama ile) kurutma

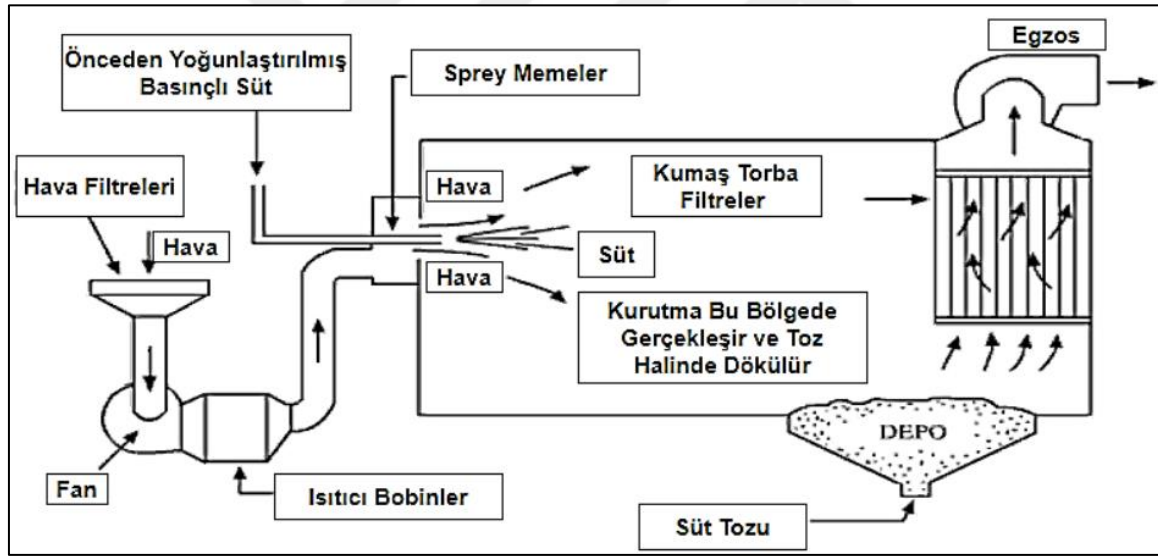
Dondurarak ya da şoklama ile kurutma sistemi temelde üç ana aşamadan oluşmaktadır. Bunlar; dondurma, birincil kuruma ve ikincil kuruma. Ani bir şekilde hızla dondurulan madde buz kristallerinin oluşmasını sağlar. Bu kristaller çözünme esnasında hızlı bir şekilde süblimleşmeyi ortaya çıkarır. Ürün ya da madde tamamen donduktan sonra ortamda bulunan hava vakum yoluyla çekilerek iç ortamdaki sıcaklığın artmasını sağlar böylece süblimleşme başlar. Ürün içerisindeki suyun bir miktarı çekildikten sonra yine aynı ürün içerisinde kalan sıvının çekilmesi amacıyla ikinci aşama olan ikincil kurumaya geçilir. Bu aşamada ürün içerisindeki su, desorpsiyonla üründen ayrılmaya devam eder ve kurutma işlemi sonuçlanır. Dondurarak (şoklama ile) kurutmanın diğer kurutma sistemlerine göre birçok avantajı bulunmaktadır. Bunlar:

- Kurutulan maddenin besin değerlerini kaybetmemesi, sağlıklı ve kaliteli bir şekilde ömrünü koruması.
- Ürün ağırlığının azalması ve buna bağlı olarak ulaşım, depolama gibi durumlarda ekonomik olarak avantaj sağlanması.
- Dondurarak kurutma yöntemi ilaç, gıda ve sanayi gibi farklı sektörlerde depolama ve belirli sıcaklıklara kadar muhafaza edilmesi gibi avantajlarından dolayı sıklıkla tercih edilmektedir.

Çeşitli avantajları olması rağmen endüstriyel kullanımda maliyet yüksek olması bir dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır [13].

3.2.5. Püskürtmeli (Sprey) kurutucular

Püskürtmeli kurutucularda kurutulacak ürün resim 3.4’de görüldüğü üzere kurutma ortamına küçük parçacıklar halinde püskürtme yoluyla verilmektedir. Bununla birlikte kurutma ortamının ihtiyacına göre yüksek seviyede sıcaklık, hava yoluyla ortama girmektedir. Sisteme verilen ürün ve hava zıt yönde ya da aynı yönde verilebilmektedir, önemli olan nokta hava ile ürün özdeş bir şekilde karışarak kurutma ortamına girmesi durumudur. Kurutma tamamlandıktan sonra özdeşleşmiş olan çıkış havası ve kurutulmuş ürün, torba filtreler ya da separatörlere yakalanmaktadır. Bu tip kurutucular genellikle deterjan, kahve, sabun, süt tozu gibi üretimlerde kullanılmaktadır [14].

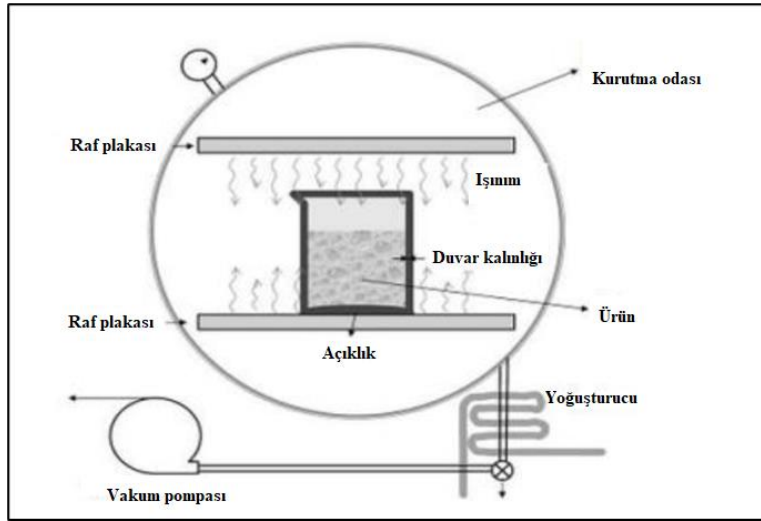


Resim 3.4. Püskürtmeli (Sprey) Kurutma sistemi [14]

3.2.6. Vakumda kurutma

Vakumda kurutma yöntemi düşük sıcaklıklarda vakumlama sonucu oksijensiz ortamda gerçekleşen kurutma türlerinden biridir. Bu kurutma sistemi, kurutulacak olan ürünün ısıya karşı duyarlı olması ve nem miktarının daha da düşürülmesi istenen yerlerde kullanılmaktadır. Bunu havasız ve daha düşük kurutma sıcaklığında gerçekleştirmektedir. Ortam içerisi vakumlu olup oksijen olmadığından dolayı oksidasyon reaksiyonu azalmaktadır. Kurutma sırasında iç ortamda bulunan su, vakumlu bölgeye girdiğinde

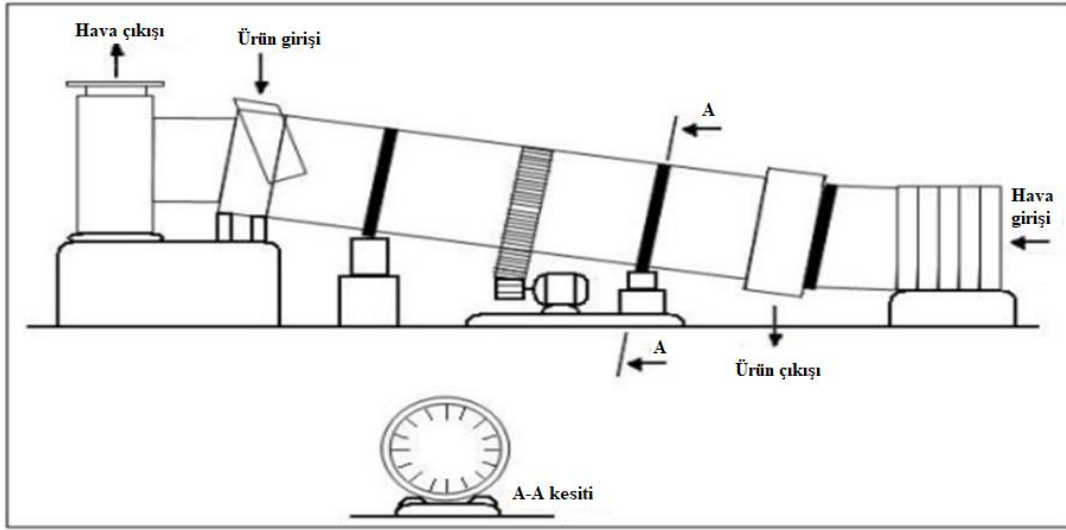
buharlaştır. Bu bölümdeki vakum sayesinde ürün içerisinde bulunan su moleküllerinin emilimi gerçekleşir. Vakumlu kurutma sisteminde, kurutucu bölme dış basınca karşı dayanıklı ve sızıntı gerçekleşmeyen bir vakum bölgesi olmasında dolayı oldukça maliyetli bir sistemdir. Bu maliyetli duruma karşı kurutma ürünü başka bir kurutma sisteminde içerisindeki nem miktarı belirli bir seviyeye kadar düşürüldükten sonra vakumda kurutma sistemine alınırsa daha ekonomik olabilir. Olumsuz maliyetli yapısına rağmen vakumlu kurutma sistemi oksijensiz vakumlanmış ortamda düşük sıcaklık ve kurutma zamanının oldukça düşük seviyelerde olması ayrıca gıda ürünlerinin kurutma sonrasında besin değerlerini korumasından dolayı tercih edilmektedir [13].



Resim 3.5. Vakumda kurutma sistemi [13]

3.2.7. Döner kurutucular

Döner kurutucu sistemi, resim 3.6’ da görüldüğü üzere hafif eğimli yatay rulmanlar üzerindeki silindirden ve silindirin iç kısmını yerleştirilmiş olan kanatçıklardan oluşmaktadır. Kanal içerisinde kurutma ürünü kurutucunun üst kısmından hava ters doğrultuda olarak hareket etmektedir böylece ısı transferi gerçekleşip kurutma tamamlanır. Bu tür kurutucu sistemler çeşitli ısı transferini artırma metotları kullanılarak zenginleştirilebilir bir yapıya sahiptir [14].



Resim 3.6. Döner kurutucu sistemi [14]

3.2.8. Mikrodalga kurutma

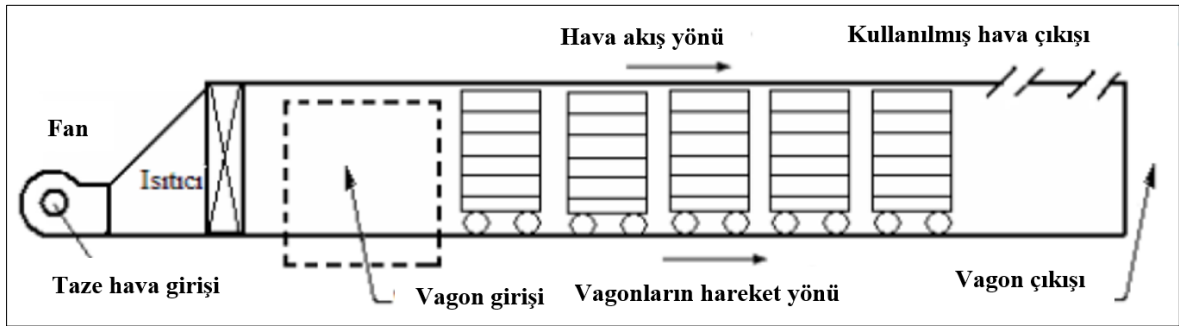
Mikrodalga kurutma sistemleri, 300 MHz -300 GHz frekans aralığında bulunan elektromanyetik dalgalar sayesinde kurutma sağlamaktadır. Yüksek frekans aralığı sayesinde oluşan elektrik alan, kurutulacak olan ürün içerisindeki moleküllerin iç sürtünmesine neden olur bu sayede ürünün hacimsel olarak ısınması sağlanır. Bu ısınma sonucunda kuruma meydana gelir. Sistem için bazı dezavantajlarda bulunmaktadır. Ürün içerisindeki su buharlaşmaya çalıştığı için maddeden dışarıya doğru bir basınç uygulanır. Oluşan bu basınçtan dolayı sistem içerisinde emniyet önlemleri alınması gerekmektedir böylece alınan önlemler birlikte sistemin maliyetli yapısı ortaya çıkar [13].

3.2.9. Dielektrik kurutma

Dielektrik kurutma sistemi, yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaların oluşturduğu elektromanyetik alan içerisinde yerleştirilmiş olan kurutma üründe bir ısı üretimi meydana getirir. Isı üretimi kurutma ürünü içerisindeki iç sürtünme sayesinde oluşmaktadır. Ürün içerisinde homojen dağılmamış olan nem oranından dolayı ıslak olan kısımlarda daha fazla ısı üretimi meydana gelirken buna karşı düşük nemli bölgelerinde ise daha düşük bir ısı üretimi meydana gelmektedir. Bunun sebebi ise farklı dielektrik sabitinin olmasıdır, örneğin sıvı haldeki bir maddenin dielektrik sabiti daha yüksek iken katı malzemelerin dielektrik sabiti genellikle su içeren maddelere göre daha düşüktür [13].

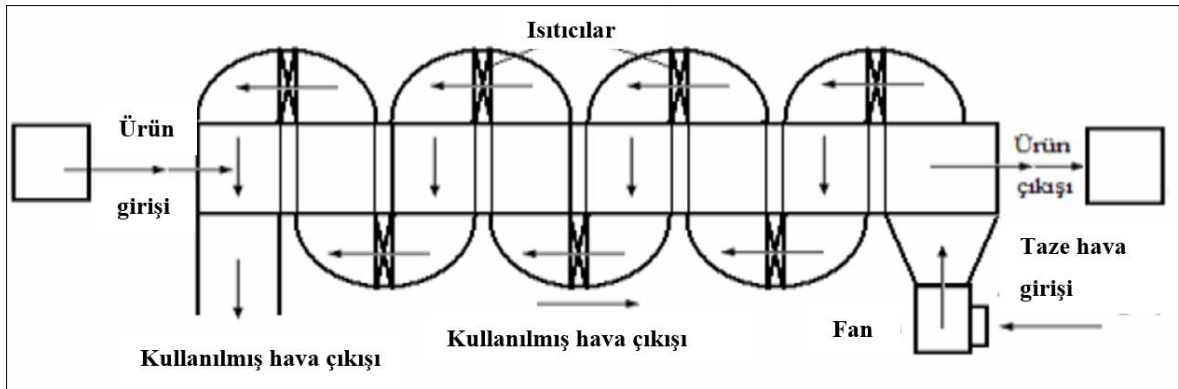
3.2.10. Tünel kurutucu

Tünel kurutuculu sistemler temelde bir kurutma tünelinde devamlı olarak hareket halinde olan bantlı bir sistem, fan, vagon, hava giriş çıkışı ve ısıtıcıdan oluşmaktadır. Resim 3.7’de görüldüğü üzere paralel akışlı bir tünel kurutucu sistemi gösterilmektedir. Kurutucu ürün vagonlara tepsiler üzerine konularak yerleştirilir ve burada ısıtılmış olan hava akışına uğrayarak ürünün kuruması sağlanır. Kurutucu ürünün ya da kurutmanın özelliklerine göre hava miktarı, ısı miktarı vagon hareket hızı ya da tünel boyu gibi farklı parametrelerin değişimine bağlı olarak ayarlanabilir [17].



Resim 3.7. Paralel akışlı tünel kurutma sistemi [17]

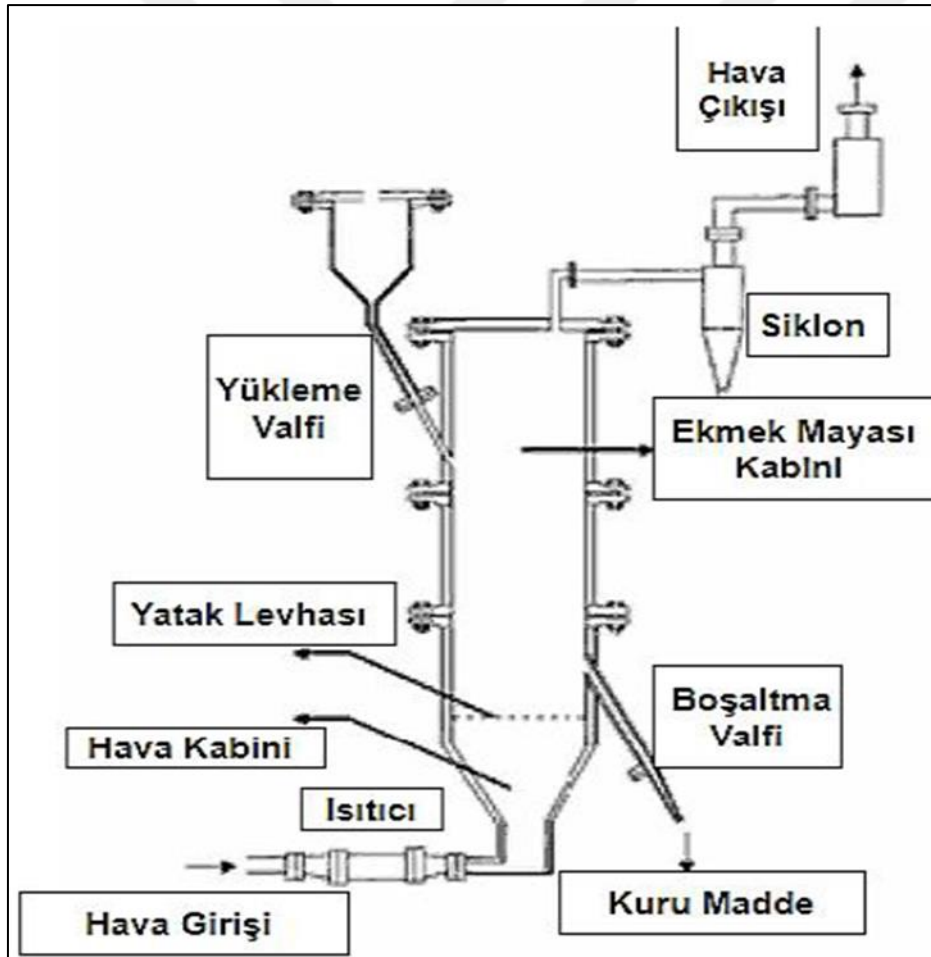
Paralel ve zıt akışlı tünel kurutucu sistemlerinin yanı sıra kullanılan bir başka tür olarak ise çapraz akışlı tünel sistemi kullanılmaktadır. Havanın akış yönü ile vagonların hareket yönü zıt yönde olup bunun yanı sıra ısıtılmış olan hava tünel boyunca çapraz hareketinden dolayı kurutma ürünlerine eşit derecede etki etmektedir bu durum hem ürün için faydalı bir durum ortaya çıkarırken hem de sistem için daha verimli bir sonuç ortaya çıkarmaktadır. Resim 3.8’de çapraz akışlı bir tünel kurutucu sistemi gösterilmiştir [17].



Resim 3.8. Çapraz akışlı tünel kurutma sistemi [13]

3.2.11. Akışkan yataklı kurutma

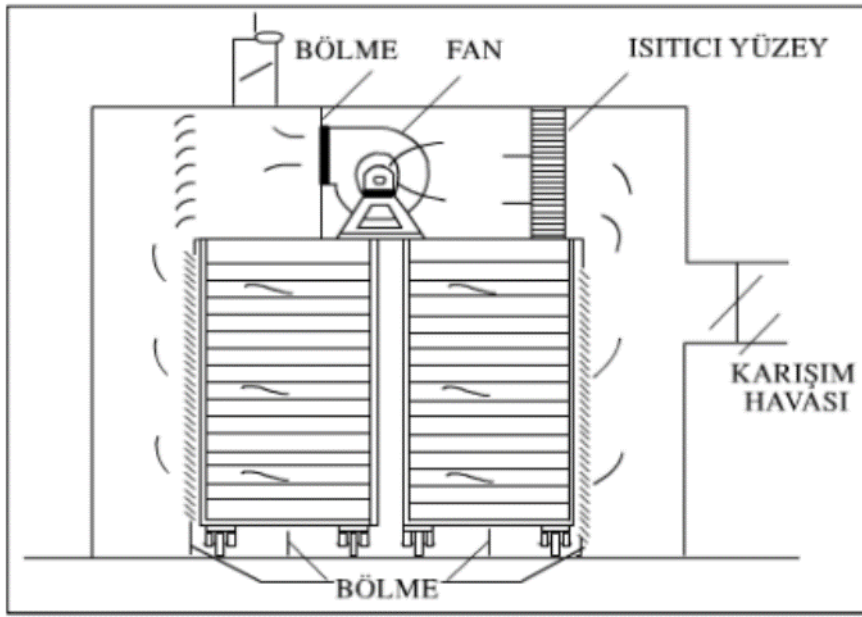
Bu kurutma sisteminde, kurutma işlemi ürünlerin havada asılı olarak kaldığı bir ortama sistemin alt kısmından verilen sıcak hava yöntemiyle gerçekleştirilmektedir. Sıcak havanın hızı kurutulacak olan ürünleri asılı kalma durumunu etkilemeyecek şekilde istenilen hızlarda ısıtma süresini belirlemek için ayarlanabilir. Kurutma havası ile tanecikler arasındaki etkileşim akışkan yataklı kurutma sisteminde oldukça iyi olduğu için kurutma verimli bir şekilde gerçekleşmektedir. Akışkan yataklı kurutma sisteminde, kurutma süresinin kısa olması ve kurutmanın ürün içerisinde homojen olarak gerçekleşmesi tercih edilme sebebinin başında gelmektedir. Bu kurutma sistemi genel olarak kömür, ilaç, plastik, fosfat gibi materyallerin kurutulmasında kullanılır [14].



Resim 3.9. Akışkan yataklı kurutma sistemi

3.2.12. Kabinli ve bölmeli kurutucular

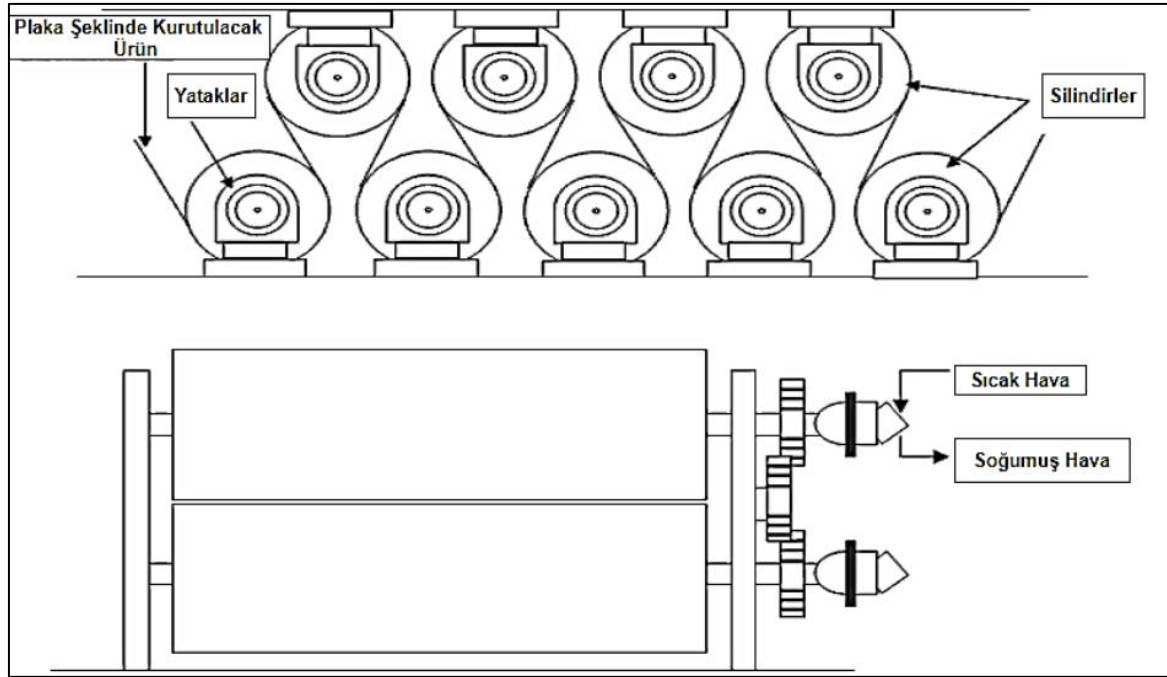
Kabinli ve bölmeli kurutuculu sistemlerde zorlanmış taşınım ile ısı transferi esasına dayanarak bir kurutma yapılmaktadır. Sistem temelde özel tasarımı bölmelerden, tepsilerden ve ısıtıcı yüzeyden oluşmaktadır. Resim 3.10’da kabinli ve bölmeli bir kurutucu tasarımı gösterilmiştir [13].



Resim 3.10. Kabinli ve bölmeli kurutma sistemi [13]

3.2.13. Silindir kurutucu

Genellikle kâğıt ve tekstil sanayisinde kullanılan bir kurutma çeşididir. Çok sayıda silindirden oluşan bir sistemdir. Silindirler buharla ısıtılırlar, ısıtılan silindirlerin içerisinden sürekli olarak kurutma ürünleri geçer. Silindirler farklı yükseklikte altta ve üstte olmak üzere konumlandırılmış olup aralarından geçen ürünlere gerekli kurutma için ısı transferini gerçekleştirirler. Resim 3.11’de bir silindir kurutucu sistem tasarımı gösterilmiştir [14].



Resim 3.11. Silindirli kurutma sistemi [14]

4. LİTERATÜR TARAMASI

Yaşam sürecinin devam etmesinde besin ürünleri temel yapı taşıdır. Bu noktada besin ürünlerinin üreticiden tüketiciye ulaşması sırasında oluşabilecek bozulmalardan korumak en dikkat çekici noktadır. Kurutma işlemleri ürünlerin daha uzun ömürlü tüketilebilirliğini uzun süreye yayma konusunda başvurulmuş hem pratik hem de geleneksel bir yöntemdir. Endüstriyel kurutma işlemlerini sağlamanın birçok yolu vardır. Günümüzde en popüler kullanılan yöntemlerden biri de güneş enerjili kurutma sistemleridir. Bu sistemler hem basit bir yapıda olması hem de düşük maliyete sahip olması ile ilgi çekici bir araç haline gelmektedir. Son günlerde bu güneş enerjili kurutucular alanında birçok çalışma yapılmıştır.

Murali ve ark. karides kurutulması için yeni bir güneş enerjili kurutucu dizayn etmişlerdir. Kullandıkları bu sistemde mobil uyarı sistemi ile entegre edilmiş PV ile çalışan tipte yarı silindirik cebri konveksiyon güneş tüneli kurutucusu modeli incelemişlerdir. Kullanılan sistemde UV stabilize polietilen film, CPVC boruları ve GI çerçeveleri ile bir PV panelinden yararlanılmıştır. Kullanılan bu sistem ile karides kurutmada %20.22'lik bir kurutma verim elde edildiği, PV panel ortalama %11,64' lük elektriksel verim elde ettiği vurgulanmıştır [18].

Azam ve ark. domates kurutmak için sera kurutucusu ile entegre PV sistemi ve güneş kolektörünün termal analizini yapmışlardır. Matematiksel bir model kullanarak zorlanmış konveksiyon karma modlu güneş enerjisi sera kurutucusu termal performansını değerlendirilmiştir. Hibrit güneş enerjisi sera kurutucusu ortalama genel verimliliği %17,96'ya ulaştığı belirtilmiştir [19].



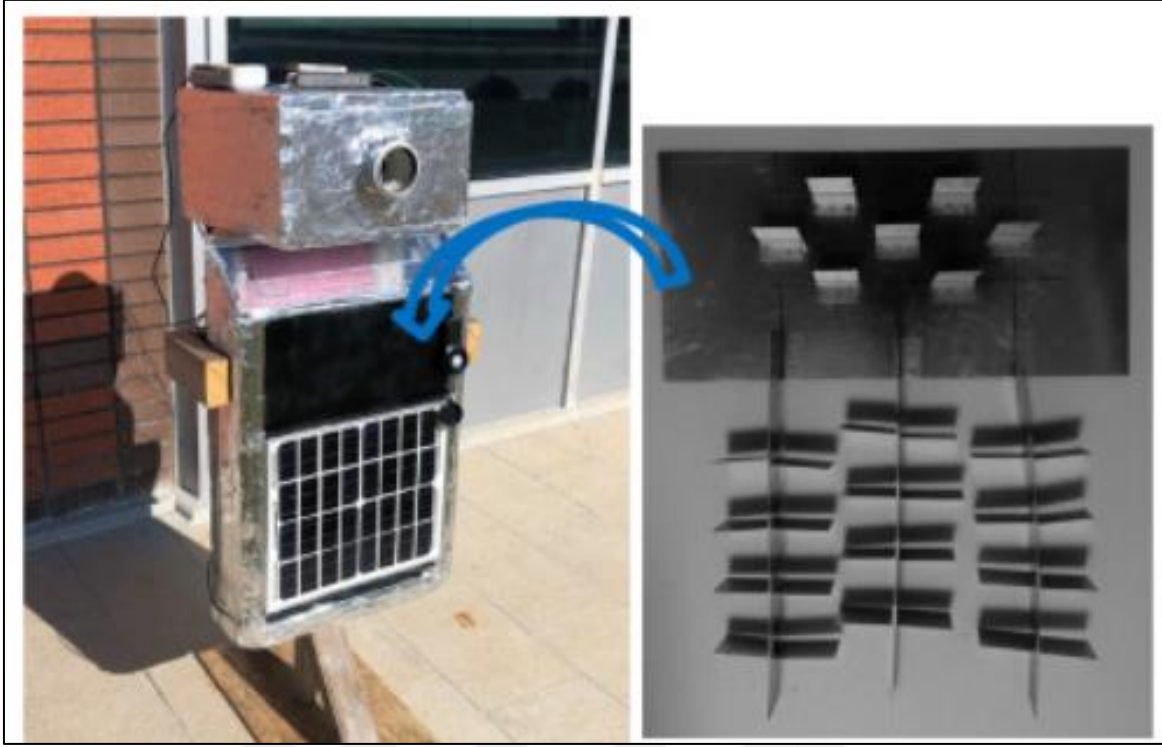
Resim 4.1. Sera kurutucusu ile entegre PV sistemi [19]

Akhijahani ve ark. güneş takip sisteminin biyolojik materyallerin güneşte kurutma kinetiği üzerindeki etkisini incelemeyi amaçlamıştır. Kurutma işlemi sırasında domates dilimlerinin kuruma davranışını incelemek için bir güneş takip ünitesi ile donatılmış laboratuvar ölçekli PV destekli bir güneş enerjisi kurutma sistemi tasarlanmış ve üretilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre güneş takip sisteminin entegrasi ile kuruma süresi %16,6'dan %36,6'ya kısaltıldığı bildirilmiştir. Ayrıca ürün kalite performansı azalmaksızın kurutma performansı daha iyi olduğu da bildirilmiştir [20].



Resim 4.2. PV destekli bir güneş enerjisi kurutma sistemi [20]

Çiftçi ve ark. kurutma amaçlı bir fotovoltaik termal sistem üzerinde çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada dikey bir güneş kurutucusu dizayn etmişler ve kurutucu sistemin kapladığı alandan tasarruf etmeyi amaçlamışlardır. Ayrıca yapılan çalışmada hem CFD analizini hem de deneysel analizleri yapmışlardır. Kanatlı ve kanatsız olarak incelenen bu sistemlerden elde edilen sonuçlarda kanatsız sistemin ısı verimi %47,46-54,86 ve kanatlı sistemin ısı verim %50,25-58,16 arasında paylaşılmıştır. Buna ek olarak kanatlı dikey kurutucuda hava akış hızı ile birlikte kurutma performansının iyileştirileceği de belirtilmiştir [21].



Resim 4.3. Dikey bir güneş kurutucu sistemi [21]

Afshari ve ark. kanalizasyon çamurunu kurutmak amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada Quonset güneş tüneli kurutucusu kullanılmış, deneysel ve sayısala olarak analiz yapmışlardır. Çalışmada dikdörtgen, quonset ve kanatlı quonset tipi olmak üzere üç tip kurutucu tüneli incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre kanatçıkların eklenmesi sistem performansını önemli ölçüde iyileştirdiği ve quonset tipi güneş tünelinin başarılı bir sistem olduğu belirtilmiştir [22].

Gürel ve ark. sıcaklık kontrollü akışkan yataklı güneş enerjili kurutma sistemi tasarlamışlardır. Bu çalışmada düz plaka ve zikzak kanatlı plaka kullanılmış olup sayısal ve deneysel olarak testi yapılmıştır. Sistemde genel verimlilik %64 bulunmuş olup düz plaka verimi %7,2, zikzak plaka verimi ise %11,6 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre geliştirilmiş olan akışkan yataklı kurutma sisteminin deneysel ve sayısal sonuçları sistemin başarılı olduğunu ortaya koymuştur [23].

Tuncer ve ark. sera kurutucusunun performansını artırmak amacıyla yeni bir çalışma yapmışlardır. Yaptıkları bu çalışmada pilot ölçekli bir sera kurutucusuna dört geçişli güneş hava kolektörü entegre etmişler. Ayrıca deneyler 0,008 ve 0,010 kg/s debilerde gerçekleştirilmiş. Yapılan deneyler sonucunda dört geçişli güneş hava kolektörünün termal verimliliğini %71,63–80,66 arasında belirtmişler ve bu sistemin entegresi ile kuruma süresinde azalma olduğunu vurgulamışlardır [24].



Resim 4.4. Dört geçişli güneş hava kolektörü [24]

Ziaforoughi ve Esfahani, patates dilimlerini kurutmak amacıyla kızılötesi destekli güneş enerjili bir kurutucu dizaynı yapmışlardır. Bu çalışmada standart güneş kurutucu ile kızılötesi entegre edilmiş kurutucu sistemi karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda kuruma süresinde kızılötesi entegresiyle %31 ila %52 arasında azalma gözlemlendiği belirtilmiştir [25].



Resim 4.5. Kızılötesi destekli güneş enerjili kurutucu sistemi [25]

Veeramanipriya ve Sundari, manyok dilimlerini kurutmak için tahliye tüp toplayıcıli termal fotovoltaik güneş kurutucusu yapmışlardır. Bu çalışmada standart güneş enerjili kurutucu ile tahliye tüp toplayıcıli kurutucu karşılaştırılmıştır. Hazne içindeki hava sıcaklığı ortam sıcaklığından 30-40 °C'ye yükseldiğinden ve kurutma içindeki nem %91,5'ten (wb) %10,67'ye (wb) düştüğünden dolayı iyi bir kâr elde edildiği gözlemlenmiştir [26].

Tiwari ve ark. fotovoltaik termal sistemleri ve fotovoltaik termal sistem entegreli sera kurutma sistemleri alanında yapılan çalışmalar konusunda inceleme yapmışlardır. Ayrıca fotovoltaik termal sistemler içinde bir modelleme yapmışlardır. Güneşte kurutmanın ürünleri korumada en sağlıklı yöntemlerden biri olduğunu vurgulamışlardır. Bunun yanı sıra 0.01 kg/s debide ortalama ısı verim, elektriksel verim ve toplam ısı verim sırasıyla %26,68, %11,26 ve %56,30 olarak bulunduğu belirtilmiştir [27].

Tiwari ve Tiwari, kurutma yapmak için kapalı olarak termal fotovoltaik güneş hava kolektörlü ve bu sistemle entegre edilmiş hibrit sistem yapmışlardır. Bu sistem için termal modelleme durumu incelenmiş farklı sıcaklık değerleri alınmış, MATLAB üzerinde sıcaklık denklemleri çözülmüştür. Kurutma sistemi içerisindeki eşdeğer ısı enerji, eşdeğer ısı verim

ve eşdeğer ekserji veriminin sırasıyla 3,24'ten 10,57 kWh/ gün'e, %61,56–42,22 ve %28,96–19,11'e değiştiği gözlemlenmiştir [28].

Bu çalışmalara ek olarak sistem performansını artırmak için farklı işlemler yapılmıştır. Nanoparçacık ve parafin malzemelerin kullanımı bu işlemlerin başında gelmektedir buna ek olarak ısı depolamalı sistemlerde sistem performansını önemli derecelerde artırmaktadır. Bu alanlarda da farklı çalışmalar yapılmıştır.

Selimefendigil ve Şirin, parafin bazlı termal enerji depolama, nanoparçacıklı parafin bazlı termal enerji depolama ve konvansiyonel depolama olmak üzere 3 farklı kolektörü tasarlamış ve deneysel olarak analizini yapmışlardır. Malzemelerin termal iletkenliğini artırmak için ise bakır oksit kullanmışlardır. Bunun yanı sıra ekserji verimleri ise konvansiyonel depolama için %10.52–13.59, parafin bazlı termal enerji depolama için %11.08–14.36 ve nanoparçacıklı parafin bazlı termal enerji depolama için ise %12.52–15,44 olarak hesaplanmıştır [29].

Chaatouf ve ark. bir güneş kurutucusunun verimliliği ve geliştirilmesi üzerine bir analiz yapmışlardır. Bakır borulara faz değiştiren malzeme doldurarak bir ısı depolama sistemi oluşturmuşlardır. Sistemdeki tüplerin dinamik ve termal davranışları incelenmiş olup ANSYS Fluent'e eklenmiştir. Bunun yanı sıra ısı depolamalı güneş kurutucusunun, depolamasız duruma göre veriminin %3,12 artışı gözlemlenmiştir [30].

Andharia ve ark. küçük ölçekli karma şekilde termal bir kurutma sistemi tasarlamışlardır ve bu sistemde bir deney gerçekleştirmişlerdir. İki adet sistemin karşılaştırmasını içeren bu sistem duyarlı enerji depolama ve gizli ısı depolamadır. Bunun yanı sıra çalışma küçük sistemler için verimli bulunmuş ve termal kurutucuların gelişmesine yardımcı olması beklenmektedir [31].

Mathew ve Thangavel, çalışmalarında termal enerji depolamalı tahliye ısı borulu kurutucu tasarlamışlardır. Ayrıca güneş kolektörüne termal enerji depolamaya sahip bir ortak kondenser dahil edilmiştir. İncelemeler sonucunda çıkış sıcaklıklarının arttığını ve kuruma süresinin azaldığını belirtmişlerdir [32].

Lamrani ve Draoui, hibrit güneş enerjili termal ısı depolama sistemi tasarımını sayısal olarak çalışmışlardır. Bu çalışmada hem termal enerji depolama hem de kurutma odasının sayısal veriler hesaplanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda kurutucu sisteminin performans analizi verilerine göre termal enerjili depolama sisteminde kuruma süresinin ısı depolaması olmayan sisteme göre daha az sürede kurutma işlemini yaptığı gözlemlenmiştir [33].

Quiñones ve ark. depolama sistemli bir güneş kurutucusu tasarlamışlar ve deneysel değerlendirmesini yapmışlardır. Ayrıca kurutma sistemlerinde iki farklı duyulur ısı malzemesi kullanmışlardır, bunlardan biri plaj kumu diğeri ise kireçtaşıdır. Yapılan deneyler neticesinde depolama malzemesi olarak kullanılan plaj kumunun verimi, kireçtaşı kurutma veriminin gerisinde kalmıştır [34].



Resim 4.6. Depolama sistemli bir güneş kurutucusu [34]

Berto ve ark. organik faz değişim malzemeli bir ısı depolama sistemi yapmış olup bu depolama sistemine ise plakalı ve kanatlı evaporatör yerleştirmişlerdir ayrıca yapılan bu çalışmayı deneysel olarak incelemişlerdir. Bunun yanı sıra sistemdeki evaporatör geometrisinin değişmesinin performans üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir [35].

Kumar ve ark. farklı türden ısı depolama malzemeleri kullanarak kurutucu verimini artırmak için çakıl içeren bir ısı depolama hazneli ve içermeyen doğal bir kurutucunun termodinamik

durumunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca çakılların ısı depolamaya uygun olup olmadığına bakmak amacıyla enerji ekserji analizi yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda ise duyulur ısı malzemesi (çakıl) kullanarak çalışmanın yapılması performans artışına katkıda bulunmuştur [36].

Kumar ve ark. tahıl kurutmak amacıyla doğal bir kurutucu tasarlamışlardır. Sistemi kurutma odası, faz değişim malzemesi, biyokütle brülörü ve dikdörtgen odadan oluşturmuşlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda kurutucu tasarımının sıcaklık ve ekserji analizini yapmış olup çalışmanın verimli olduğu gözlemine varmışlardır [37].

Chaouch ve ark. deve eti kurutmak için ısı depolamalı dolaylı konveksiyonlu bir güneş kurutucusu ve ısı depolamalı doğrudan zorunlu konveksiyonlu bir güneş kurutucusu geliştirmiş olup çalışmanın performans analizlerini yapmışlardır. Ayrıca analizler ortamın iklim koşullarına uygun olarak yapılmıştır. Çalışmaların sonucunda duyulur ısı depolamalı sistemi güneş kolektörünün verimini arttırdığı gözlemlenmiştir [38].



Resim 4.7. Isı depolamalı dolaylı konveksiyonlu bir güneş kurutucusu [38]

Rabha ve Muthukumar, parafin bazlı gizli ısı depolamalı kurutucu ile birleştirilmiş zorunlu konveksiyonlu iki çift geçişli iki farklı güneş kurutucusu tasarlayıp bu tasarımların üzerinde performans analizleri yapmışlardır. Ayrıca yapılan bu sistem kurutma odası, üfleyici ve ısı depolama biriminden oluşmaktadır. Bunun yanı sıra sistemin her bir bileşeninin enerji ve ekserji analizleri yapılmış olup gizli ısı depolamalı güneş enerji kurutucusunun veriminin daha verimli çıktığı gözlemlenmiştir [39].



Resim 4.8. Gizli ısı depolamalı ve çift geçişli kurutucu [39]

Shalaby ve Bek, enerji depolama malzemesi olarak parafin mumu kullanılan güneş kurutucusu tasarımını deneysel olarak analiz etmişlerdir. Sistemde bulunan bileşenler kurutucu bölmesi, depolama birimleri, üfleyici ve iki özdeş güneş hava ısıtıcısıdır. Yapılan gözlemler ve deney sonucunda parafin kullanılan kurutucunun kullanılmayan kurutucuya göre ortam hava sıcaklığının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir [40].

Agarwal ve Sarviya, gıda kurutmak amacıyla yapılan bu çalışmada boru tipi ısı depolama tasarlanmış olup ısı malzemesi olarak parafin mumu tercih edilmiştir. Bunun yanı sıra ısı depolama sisteminin sıcaklık ve ısı transfer özellikleri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda ise parafin mumlu ısı depolama malzemesinin verimli bir sonuç gösterdiği ortaya konmuştur [41].

Lamrani ve Draoui, gizli ısı enerjisi depolamalı dolaylı hibrit elektrikli bir ahşap kurutucunun tasarımını matematiksel olarak incelemek için yapılan bu çalışmada hem kurutma odası hem de enerji depolama sistemi için iki farklı sayısal model yapılmış ve deneysel verilerle desteklenmiştir. Yapılan bu çalışmalar neticesinde kurutma sisteminde

termal depolamanın kullanılmasıyla birlikte ortam hava sıcaklığının artığı gözlemlenmiştir [42].

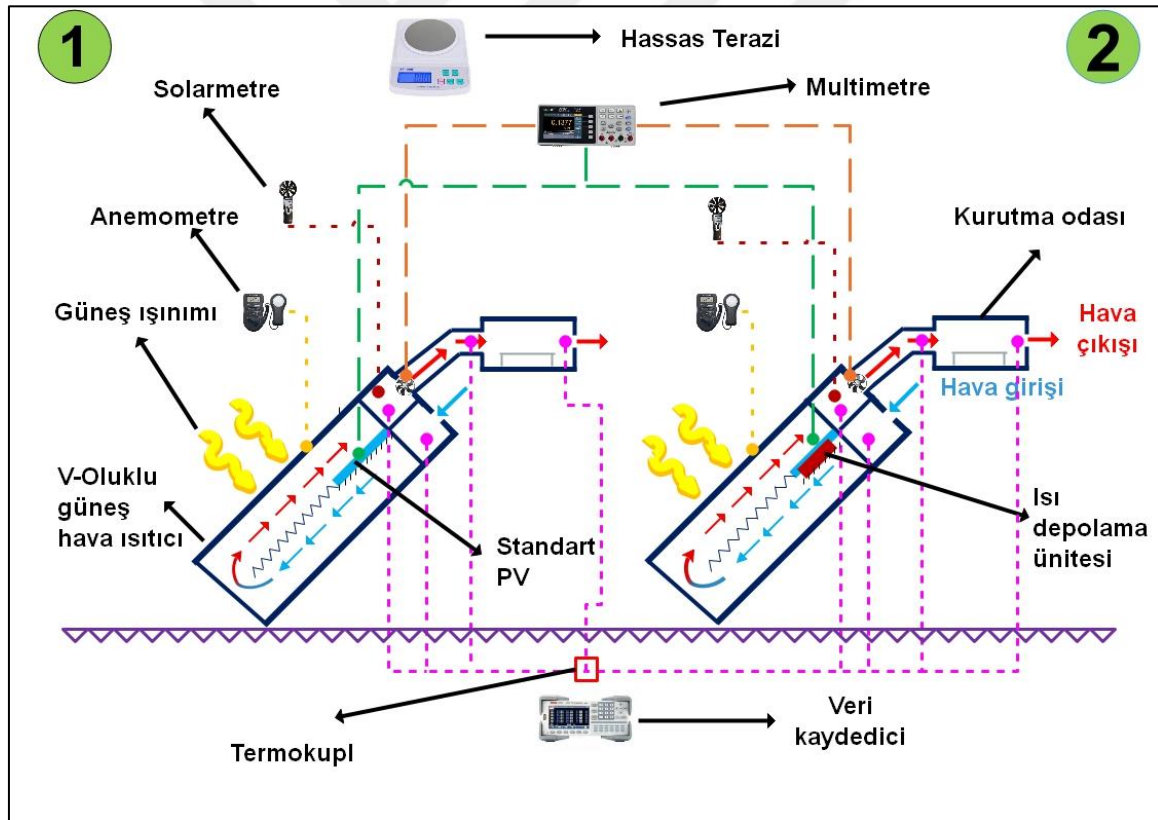




5. DENEYSEL ANALİZ

5.1. Deney Düzeneği

Mevcut çalışmada çift geçişli V-oluklu tip fotovoltaik termal kurutucunun (PVT) performansı deneysel olarak incelenmiştir. Başlangıçta çift geçişli V-oluklu tip PVT toplayıcı inşa edilmiştir. Aynı boyutlarda oluşturulan iki adet V-oluklu tip fotovoltaik kurutuculardan birine sistem performansına etkisinin araştırılması amacıyla parafin bazlı termal enerji depolama ünitesi sisteme entegre edilmiştir. Entegre edilen bu ısıl depolama ünitesinin de montajının da tamamlanmasıyla testler bu iki deneysel sistemde (MODEL_1 ve MODEL_2) aynı çevresel koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1’de mevcut test sistemlerinin şeması verilmiştir.



Şekil 5.1. Deney düzeneğinin şematik görünümü [MODEL_1 ve MODEL_2]

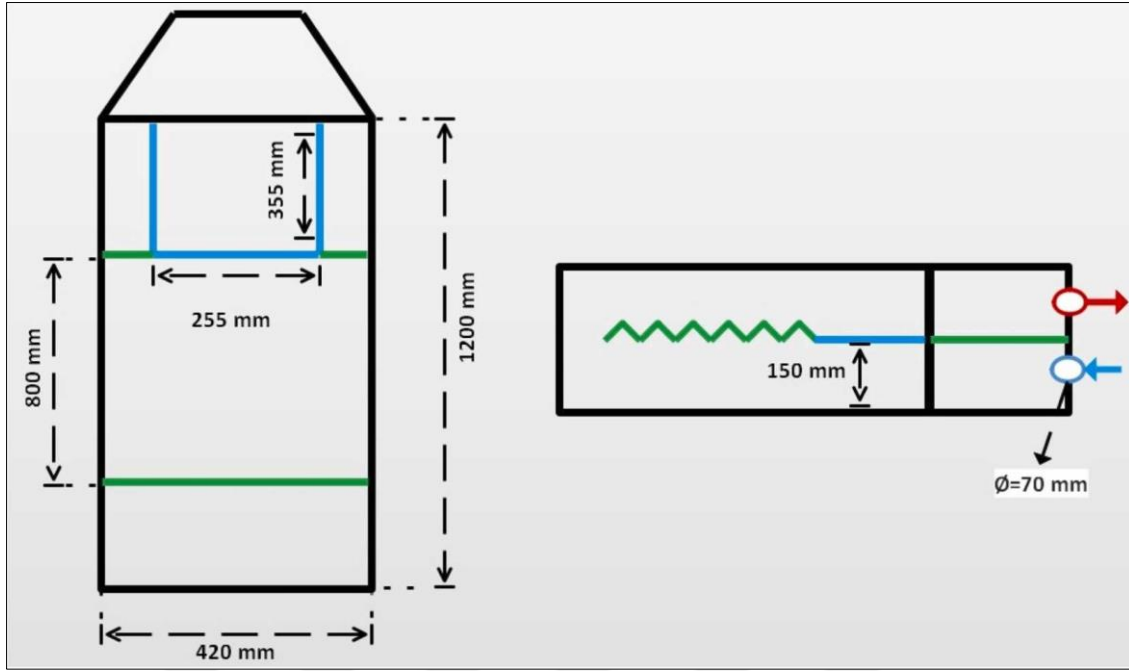
Geliştirilmiş olan her bir kolektör eşit boyutlardadır. Kolektör içerisindeki emici plakanın uzunluğu 800 mm alınmıştır. Bu çalışmada kullanılan güneş enerjili kurutucuların kolektör kasası ve kurutma odası tasarımında düşük maliyetli, yüksek izolasyonlu ve hafif yapısından dolayı XPS Strafor izolasyon malzemesi tercih edilmiştir. Kolektör kasası dizaynı için XPS

Straforun başlangıçta ölçülmüş olan uygun boyutlara göre kesilme işlemi gerçekleştirilmiştir. Kesilen parçaların birleştirilme işlemi şeffaf silikon kullanılarak yapılmıştır. Şeffaf silikon sayesinde hem daha mukavemetli bir yapı oluşturulmuştur hem de sızdırmazlık sağlanmıştır. Aynı durum kurutma odası için de yapılmıştır buna ek olarak kurutma odası içerisinde kurutma amacıyla kullanılan elmalar için yine strafor ve ince yapılı elyaf ile her iki deney düzeneğiyle eş bir biçimde tepsi hazırlanmıştır. Bu tepsi sayesinde aynı boyutlarda dilimlenmiş olan elmalar kurutucu odasındaki yüzeylere temas etmeden nem uzaklaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Böylece sistem uygun maliyetlerle tasarlanabilmiş ve ulaşım için uygun koşullar sağlanabilmiştir. Ayrıca sistemin güneş ışınlarına karşı yalıtılması ve hava sızıntılarının önlenmesi amacıyla alüminyum kaplama yapılmıştır.



Resim 5.1. Güneş hava kolektörü kasası ve emici plaka

Her iki test sisteminde de V-oluklu tip soğurucu yüzeyler kullanılmıştır. Geliştirilen ilk sistemde soğurucu yüzeyi siyah mat boya ile kaplanıp kolektör kasasına (MODEL_1) monte edilirken, ikinci sistemde V-oluklu tip soğurucu yüzeyi üzerine parafin bazlı termal depolama ünitesi eklenmiştir. Siyah mat boya (MODEL_2) ile kaplanmıştır.



Şekil 5.2. Kolektör kasası boyutları detaylı gösterimi

Üretilen kolektör kasasının boyutları ise 1200x420x150 mm ölçülerindedir. Şekil 5.2’de kolektör kasası boyutları detaylı olarak gösterilmiştir. Ek olarak fanların elektrik ihtiyacının sistem içerisinde karşılanabilmesi için her bir kolektöre elektrik enerjisi sağlayacak şekilde detaylı özellikleri Tablo 1’de verilen fotovoltaiik modüller entegre edilmiştir. Her iki sistem için de hava çıkışına 70x70 mm boyutlarında ve 40 W gücünde emiş fanları monte edilmiştir. Benzer şekilde hava giriş noktasına 70x70 mm PVC hava kanalı entegre edilmiştir.

Çizelge 5.1. Fotovoltaiik panel ayrıntıları

Parametre	Özellikler
Modeli	Solarinka Güneş Paneli
Maksimum Güç (P_{maks})	12 W
Maksimum Gerilim (V_{max})	23,25 V
Maksimum Akım (I_{max})	0,52
Açık devre voltajı (V_{oc})	23,45 V
Kısa devre akımı (I_{sc})	0,58
Boyut	355x255x20 mm

Çizelge 5.2. Kullanılan ekipman/cihazların ayrıntılı listesi

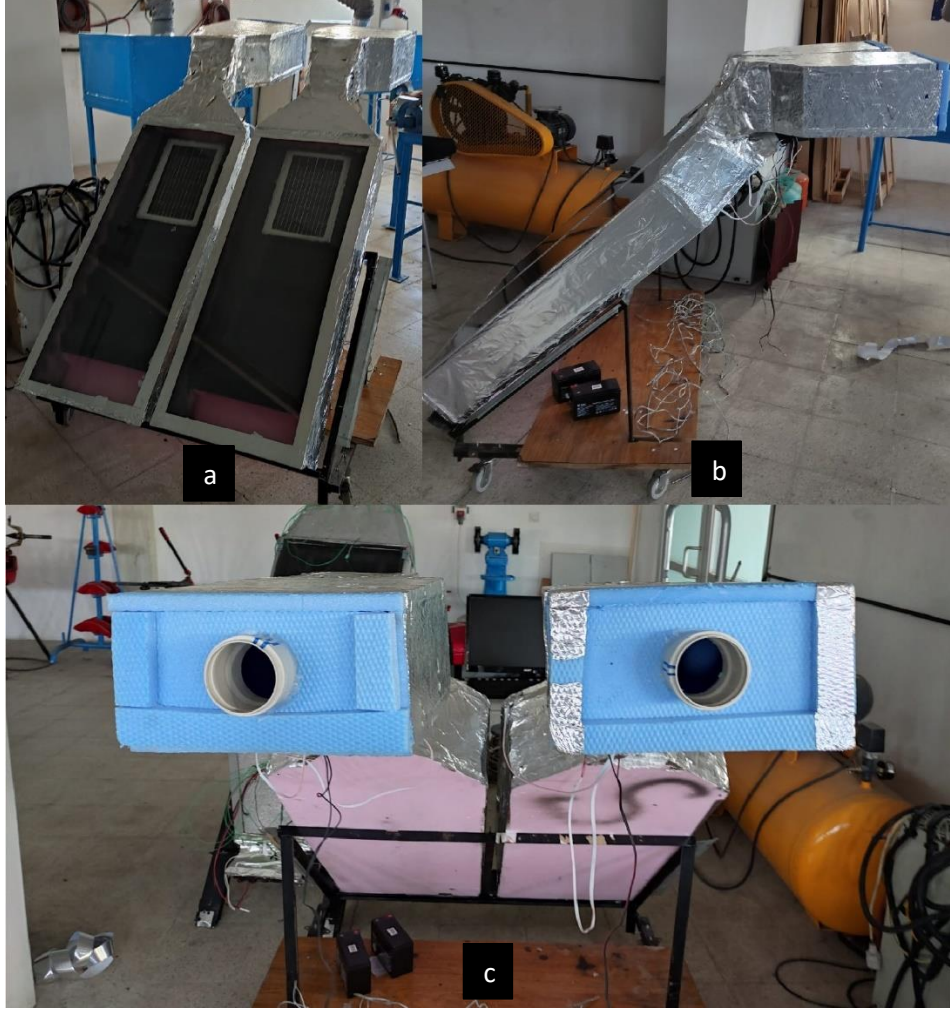
Ekipman/Cihaz	Ölçüm aralığı	Hassasiyet
Veri kaydedici	- 40 +1760°C	±% 0,5
Termokupllar	-200 +1200°C	±% 0,5
Hassas terazi	6100 g	±0,01 g
Anemometre	1,00- 30,00 m/s	±%3 m/s
Solar metre	0-1300 W/m ²	± % 0,5 W/m ²

Sistemde belirlenen alanların sıcaklık ölçümlerini almak için 8 adet termokupl kullanıldı. Her termokupl, veri kaydedicinin her kanalına ayrı ayrı bağlandı. Kolektör çıkışındaki hava akış hızını ölçmek ve güneş ışınlamını ölçmek için sırasıyla bir anemometre ve bir solarmetre de kullanıldı. Ayrıca kurutma odasındaki numunelerin ağırlıklarında belirli periyotlarda meydana gelen değişikliklerin kaydedilmesi için teraziden yararlanılmıştır. Test sisteminde kullanılan alet/cihazların detayları çizelge 4.1'de verilmiştir.

5.2. Deneysel Prosedür

Deneyler Gazi Üniversitesi merkez yerleşkesinde gerçekleştirildi. Her bir güneş enerjili kurutucu, 40° eğimle taşıyıcı platformlar üzerine konumlandırıldı. Daha önce de belirtildiği gibi kolektörlerde hava emişini sağlamak ve kurutma odasına aktarmak için 40 W gücünde, 70x70 mm emiş fanları kullanılmıştır. Üretilen bu sistemin kurutma performansını analiz etmek için altın elma dilimleri kurutma odasında kurutulmuştur. Deneysel veriler 2022 Eylül ayında saat 09:00 ile 17:00 arasında 40 dakikalık periyotlarla kaydedilmiştir. Sistemlerden biri standart bir kurutma odası entegreli V-oluk tip kolektör kullanılarak gerçekleştirilirken diğeri ise kurutma odası entegreli, termal enerji depolama ünitesine sahip V-oluklu tip kolektördür. Her sistem için kurutma odasının, kolektör giriş ve çıkış noktalarının hava sıcaklıkları ölçülmüştür. Benzer şekilde kurutma odasında ve kolektör giriş ve çıkış noktalarında hava akış hızları ölçülmüştür. Ayrıca güneş ışınlamı, fotovoltaiik panelin ürettiği akım ve gerilim değerleri, emici fanın tükettiği akım ve gerilim değerleri ile numunelerin belirlenen periyotlarda kurutma odasındaki ağırlıkları ölçülerek kayıt altına alınmıştır.

Deneysel verileri daha sağlıklı bir şekilde elde etmek amacıyla deney üç kere tekrarlanmıştır. Bu ölçümler sonucunda elde edilen veriler ortalama değerler olarak alınmıştır. Bu bağlamda oluşturulan grafikler de daha net sonuçlar içermiştir.



Resim 5.2. Kurulan deney sistemlerinin (a) ön, (b) sol yan ve (c) üst görünüşleri



6. TEORİK ANALİZ

Teorik analiz temel olarak deneyler sonucunda bulunan sonuçların ya da farklı teorik analizlerin hesaplanması sonucunda bulunan bağıntıların mevcut problemi çözmesi amacıyla kullanılmaktadır. Teorik çalışmaların deneysel çalışmalar ile kıyaslanması doğru veri analizi noktasında oldukça önemlidir. Bunun yanı sıra farklı sebeplerden dolayı deneysel olarak verilerin elde edilemeyeceği durumlar söz konusu olduğunda teorik analiz gerekli bilgileri toplayabilmek adına yardımcı olmaktadır. Analizi yapılan güneş enerjili hava kurutucusunun deneysel sonuçlara dayalı olarak yorumlanması için gerekli denklemler verilmiştir.

6.1. Güneş Kolektörüne İlişkin Hesaplamalar

Kolektör için giren enerji $\dot{E}_g$ olarak ifade edilirken, çıkan enerji ise $\dot{E}_ç$ olarak ifade edilmektedir. Enerjinin korunumu kanununa dayanarak giren ve çıkan enerjilerin eşit olması ifadesi Eş. 6.1'de verilmiştir. Kurutma odasına giren enerjinin bir kısmı faydalı enerji olarak kullanılabilirken bir kısmı ise ortamda kaybolan enerjidir. Eş. 6.2 ile gösterilmiştir.

$$\dot{E}_g = \dot{E}_ç \quad (6.1)$$

$$\dot{E}_g = \dot{E}_{kullanılan} + \dot{E}_{kayıp} \quad (6.2)$$

Kütlenin korunumu gereğince kolektöre belirli bir zamanda giren kütle miktarı ile çıkan kütle miktarı birbirine eşittir. Bu bilgiler ışığında giren kütleli debi $\dot{m}_g$ ile çıkan kütleli debi ise $\dot{m}_ç$ ile Eş. 6.3 ile verilmiştir.

$$\dot{m}_g = \dot{m}_ç \quad (6.3)$$

Kütleli debi hesabında ise ρ yoğunluğu, v hızı, emici yüzey alanını ise A_{abs} ifade eder. Kütleli debi bu girdiler ile Eş. 6.4'te elde edilmiştir.

$$\dot{m} = \rho v A_{abs} \quad (6.4)$$

Elde edilen veriler sonucunda tasarlanan kolektörlere giren enerji Eş. 6.5 ile hesaplanmıştır. Bu eşitlikte yer alan τ kolektör kasasının üst yüzeyinde kullanılan cam kapağın güneş radyasyonu geçirgenlik oranını, α emicilik katsayısını, R güneş radyasyon miktarını ve A_{abs} kolektörün emici yüzey alanını ifade etmektedir.

$$E_{g_{kol}} = \tau \alpha R A_{abs} \quad (6.5)$$

Güneş enerjisinden sağlanan enerjinin hesaplanması sonucunda kolektör performansının ortaya çıkabilmesi için her bir kolektörde kullanılabilir enerji miktarının hesaplanması gerekmektedir. Sıcaklık farkına bağlı olarak bu değer Eş. 6.6 ile hesaplanabilir. Bu eşitlikte $\dot{m}_a$ havanın kütleli debisini, c_p özgül ısı kapasitesini, T_ζ çıkan sıcaklığı T_g ise giren sıcaklığı ifade etmektedir.

$$E_{kullanılan_{kol}} = \dot{m}_a c_p (T_\zeta - T_g) \quad (6.6)$$

Kolektörün ısı verimi hesaplanırken ise kolektörde kullanılan enerjinin, kolektöre giren enerjiye oranı olarak ifade edilir. Buna göre güneş kolektörünün ısı verimi Eş. 6.7 ile verilmiştir:

$$\eta_{th_{kol}} = \frac{E_{kullanılan_{kol}}}{E_{g_{kol}}} = \frac{\dot{m}_a c_p (T_\zeta - T_g)}{\tau \alpha R A_{abs}} \quad (6.7)$$

Sistem ekserji değerleri güneş enerjili hava kolektörlerinde dikkate alınması gereken temel parametrelerden biridir. Sistem ekserjisi, sistemde kullanılabilen enerjini kalitesini, faydalı enerji miktarını ve enerjinin kalitesini ifade eder. Bu bağlamda Eş. 6.8 ile belirtilen ekserji verimi ifadesinde $X_{\zeta_{kol}}$ kolektörden çıkan ekserjiyi, $X_{g_{kol}}$ kolektöre giren ekserjiyi ifade etmektedir.

$$\eta_{X_{kol}} = \frac{X_{\zeta_{kol}}}{X_{g_{kol}}} \quad (6.8)$$

Burada verilen $X_{g_{kol}}$ kolektöre giren ekserji ise Eş. 6.9 ile ifade edilmiştir. Bu bağıntı da $X_{kayıp_{kol}}$ kolektördeki kayıp ekserji miktarını, $X_{\zeta_{kol}}$ kolektörden çıkan ekserji miktarını ifade etmektedir.

$$X_{g_{kol}} = X_{kayıp_{kol}} + X_{\zeta_{kol}} \quad (6.9)$$

Eş. 6.9' da bulunan her terim, Eş. 6.10, 6.11 ve 6.12 ile detaylı olarak açıklanmıştır.

Bağıntılarda yer alan $T_{\zeta_{evre}}$ çevre sıcaklığını, $T_{güneş}$ güneş sıcaklığını ifade etmektedir.

$$X_{g_{kol}} = \left(1 - \frac{T_{\zeta_{evre}}}{T_{güneş}}\right) R \quad (6.10)$$

$$X_{\zeta_{kol}} = \dot{m}_a c_p [(T_{\zeta} - T_g) - T_{\zeta_{evre}} \ln \left(\frac{T_{\zeta}}{T_g}\right)] \quad (6.11)$$

$$X_{kayıp_{kol}} = \left[\left(1 - \frac{T_{\zeta_{evre}}}{T_{güneş}}\right) R \right] - \dot{m}_a c_p [(T_{\zeta} - T_g) - T_{\zeta_{evre}} \ln \left(\frac{T_{\zeta}}{T_g}\right)] \quad (6.12)$$

6.2. Fotovoltaik Panele İlişkin Hesaplamalar

Sisteme entegre edilen fotovoltaik panellerin elektriksel verimleri ve elektriksel ekserji değerleri sistemin genel performansına etki etmektedir. Fotovoltaik panellerin aşırı ısınması elektrik üretimi konusunda bir performans düşüşü meydana getirebilmektedir. Eş. 6.13'te η_e fotovoltaik panelin verimini ifade eder, bu değer bulunurken $E_{e_{PV}}$ fotovoltaik panelden alınan elektriksel gücü, E_g fotovoltaik panelin giriş gücünü ifade eder. Eş. 6.14 ile fotovoltaik panelin elektriksel ekserji verimi η_{X_e} bulunur. Bu bağıntı hesaplanırken X_e elektriksel ekserjiyi, fotovoltaik panele giren ekserjiyi ise X_g ifade eder. E_g Eş. 6.16 ile gösterilmiştir. Bu bağıntıdaki A_{PV} fotovoltaik panelin yüzey alanını ifade eder.

$$\eta_e = \frac{E_{e_{PV}}}{E_g} \quad (6.13)$$

$$\eta_{X_e} = \frac{X_e}{X_g} \quad (6.14)$$

Elektriksel ekserji hesaplanırken fotovoltaik panelin gücüne ve doluluk faktörüne göre hesaplama yapılır. Eş. 6.15 ile hesaplanır bu bağıntıda; fotovoltaik panelin açık devre gerilimi V_{oc} ile gösterilir, I_{sc} panelin kısa devre akımını, FF ise fotovoltaik panelin doldurma faktörü olarak ifade edilmiştir.

$$E_{e_{PV}} = X_e = V_{oc} I_{sc} FF \quad (6.15)$$

$$E_g = \tau \alpha R A_{PV} \quad (6.16)$$

$$X_g = \left(1 - \frac{T_{\text{çevre}}}{T_{\text{güneş}}}\right) R \quad (6.17)$$

Doldurma Faktörü (FF), fotovoltaik panellerde gerçekte üretilen elektrik gücünün, panelin teorik gücüne göre oranı olarak ifade edilmektedir. Eş. 6.18 ile gösterilmiştir burada I_{max} panelin maksimum akımını, V_{max} panelin maksimum gerilimini, fotovoltaik panelin açık devre gerilimi V_{oc} ile gösterilir, I_{sc} panelin kısa devre akımını belirtmektedir.

$$FF = \frac{I_{max} \times V_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (6.18)$$

6.3. Kurutma Parametrelerine İlişkin Hesaplamalar

Kurutucunun performans analizi için kütlenin korunumu ve enerjinin korunumu dikkate alınarak aşağıdaki bağıntılar yazılabilir. Eş. 6.19 ile $\dot{m}_{g_{KO}}$ kurutma odasına giren kütleli debi ile $\dot{m}_{\text{ç}_{KO}}$ kurutma odasından çıkan kütleli debinin eşit olduğu belirtilmiştir. Eş. 6.20 ile $\dot{E}_{g_{KO}}$ kurutma odasına giren enerji ile $\dot{E}_{\text{ç}_{KO}}$ kurutma odasından çıkan enerjinin eşit olduğu ifade edilmiştir.

$$\dot{m}_{g_{KO}} = \dot{m}_{\text{ç}_{KO}} \quad (6.19)$$

$$\dot{E}_{g_{KO}} = \dot{E}_{\text{ç}_{KO}} \quad (6.20)$$

Eş. 6.20 detaylı olarak incelendiğinde, Eş. 6.21 elde edilir. Bu bağıntı ile giren toplam enerji miktarı ile çıkan toplam enerji miktarı detaylı olarak incelenmiştir. Q_{net} net ısı transferini, $h_{g_{KO}}$ kurutma odası giriş entalpisini, $h_{\text{ç}_{KO}}$ kurutma odası çıkış entalpisini, z_g giriş yüksekliğini, $z_{\text{ç}}$ çıkış yüksekliğini, $v_{g_{KO}}$ kurutma odası giriş hızı, $v_{\text{ç}_{KO}}$ kurutma odası çıkış hızı, m_{KO} kurutma odasını kütlesini, W_{net} net işi ifade etmektedir.

$$Q_{net} + \sum m_{KO} \left(h_{g_{KO}} + \frac{v_{g_{KO}}^2}{2} + z_g g \right) = \sum m_{KO} \left(h_{\text{ç}_{KO}} + \frac{v_{\text{ç}_{KO}}^2}{2} + z_{\text{ç}} g \right) + W_{net} \quad (6.21)$$

Kurutulmuş ürünün nem içeriği veya nem oranı ise m_1 kurutulmuş ürünün ilk halindeki kütlesi ile m_2 kurutulmuş ürünün son hali olarak Eş. 6.22 ile ifade edilmiştir.

$$MC = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \quad (6.22)$$

Eş. 6.23 ile kurutma odasının ekserjisi $X_{g_{KO}}$ hesaplanırken, $X_{kayıp_{KO}}$ kurutma odasında ısıtım, taşınım gibi belirli kayıplardan dolayı kullanılamayan ekserji, $X_{\zeta_{KO}}$ ise kurutma odasından çıkan ekserji miktarlarının toplamını ifade etmektedir. Eş. 6.24 ile kurutma odasında kayıp ekserji miktarı bulunurken kurutma odasına giren ekserji miktarı ile kurutma odasından çıkan ekserji miktarı arasındaki fark incelenir. Bu bağında $X_{g_{KO}}$ kurutma odası giriş ekserjisi, $X_{\zeta_{KO}}$ kurutma odası çıkış ekserjisini ifade etmektedir.

$$X_{g_{KO}} = X_{kayıp_{KO}} + X_{\zeta_{KO}} \quad (6.23)$$

$$X_{kayıp_{KO}} = X_{g_{KO}} - X_{\zeta_{KO}} \quad (6.24)$$

$X_{g_{KO}}$ kurutma odası giriş ekserjisi ile $X_{\zeta_{KO}}$ kurutma odası çıkış ekserjisi detaylı olarak Eş. 6.25 ve 6.26 ile detaylı olarak ifade edilmiştir.

$$X_{g_{KO}} = m_{KO} c_{phava} \left[(T_{g_{KO}} - T_{\zeta_{evre}}) - T_{\zeta_{evre}} \ln \left(\frac{T_{g_{KO}}}{T_{\zeta_{evre}}} \right) \right] \quad (6.25)$$

$$X_{\zeta_{KO}} = m_{DC} c_{phava} \left[(T_{\zeta_{KO}} - T_{\zeta_{evre}}) - T_{\zeta_{evre}} \ln \left(\frac{T_{\zeta_{KO}}}{T_{\zeta_{evre}}} \right) \right] \quad (6.26)$$

Bu hesaplamalar sonucunda kurutma odasının ekserji verimi $\eta_{X_{KO}}$ ile ifade edilir.

$$\eta_{X_{KO}} = \frac{X_{\zeta_{KO}}}{X_{g_{KO}}} \quad (6.27)$$

Sürdürülebilirlik endeksi (SI) mevcut sistemin ömrünü ifade etmektedir. Kullanılabilen faydalı enerjinin sistemin çalışma süreci boyunca devam edebilme durumudur. Ekserji ile doğru orantılıdır. Eş. 6.28 ile ifade edilmiştir.

$$SI = \frac{1}{1-\eta_{X_{KO}}} \quad (6.28)$$

Atık ekserji oranı (WER), ekserji kaybının artmasıyla artar bu nedenle atık ekserji oranının düşük olması beklenir. Ayrıca sürdürülebilirlik indeksi ile ters orantılı ifadelerdir. Eş. 6.29 ile ifade edilmiştir.

$$WER = \frac{X_{kayıp}}{X_g} \quad (6.29)$$

6.4. Belirsizlik Analizi

Holman (2001) tarafından sağlanan belirsizlik hesaplama yaklaşımı dikkate alınarak deneysel cihazların ve/veya enstrümantasyonların belirsizlikleri hesaplanmıştır. Eş. 6.30 hesaplamalar için kullanılan matematiksel formülü göstermektedir [30]:

$$U_{EF} = \left[\left(\frac{\partial F}{\partial x_1} U_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2} U_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_3} U_3 \right)^2 \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_n} U_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6.30)$$

Denklemden (30); U belirsizliği belirtirken, EF, x ve u sırasıyla ölçülen deneysel bulguyu, bağımsız değişkeni ve bağımsız değişkenin belirsizliğini temsil eder. Aletlerden ve bağlantılardan veri okunmasından kaynaklanan hatalar ve yukarıdaki denklem dikkate alınarak bu çalışmadaki belirsizliğin $\pm\%1$ civarında değiştiği hesaplanmıştır ve bunların her biri Çizelge 6.1.'de görülmektedir.

Çizelge 6.1. Deneyde kullanılan cihazların belirsizliği

Cihaz	Teknik özellikler	Kesinlik	Belirsizlik
Veri kaydedici	-40 + 1760 °C	$\pm\%0,5$	$\pm 0,6728$
Termokupl	-200 + 1200 °C	$\pm\%0,5$	$\pm\%1,1180$
Hassas terazi	0-6100 g	$\pm 0,01$	$\pm\%1,0000$
Solar metre	0-1300 W/ m ²	$\pm\%0,5$	$\pm 1,1456 \%$
Anemometre	1-30 m/sn	$\pm\%3$	$\pm\%1,1192$

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

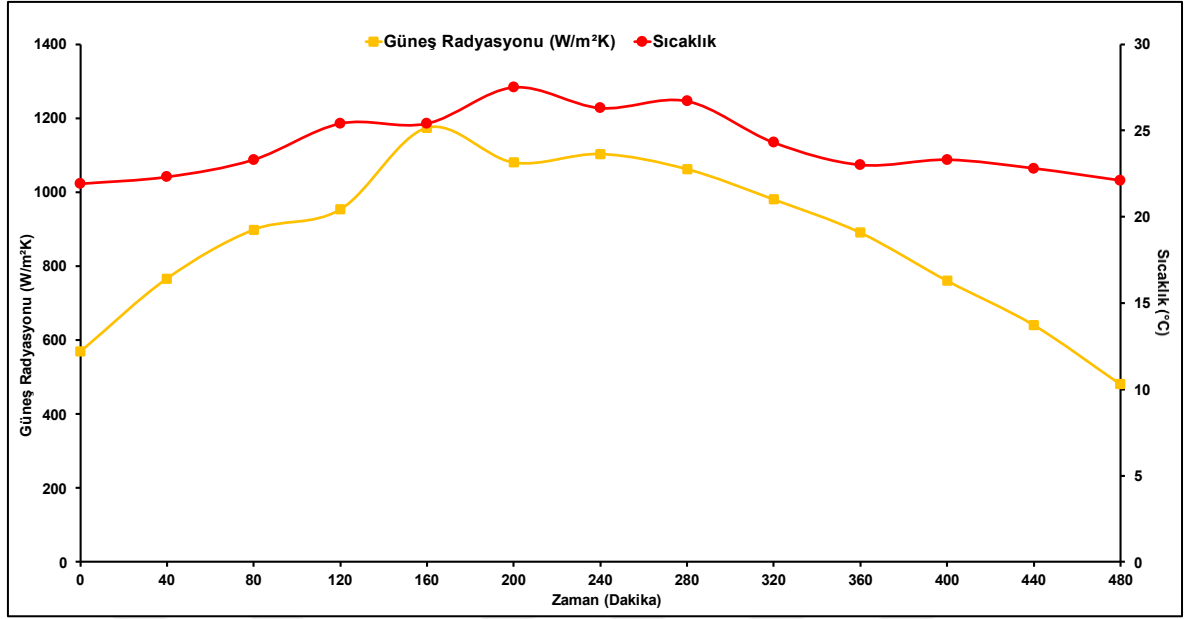
Çalışmanın bu bölümünde, üretilen standart PVT kurutucunun yanı sıra termal enerji depolama performansına ilişkin değişen parametrelere bağlı olarak elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

Resim 7.1.'de her bir PVT kurutucudan elde edilen kurutulmuş ürünlerin fotoğrafları gösterilmektedir. Her iki resimde de ürünlerin nem oranlarının bozulmadan azaldığı görülmüştür.



Resim 7.1. Kurutulmuş numunenin a) termal enerji depolamalı b) standart tip kurutucuda kurutulması sonrası fotoğrafları

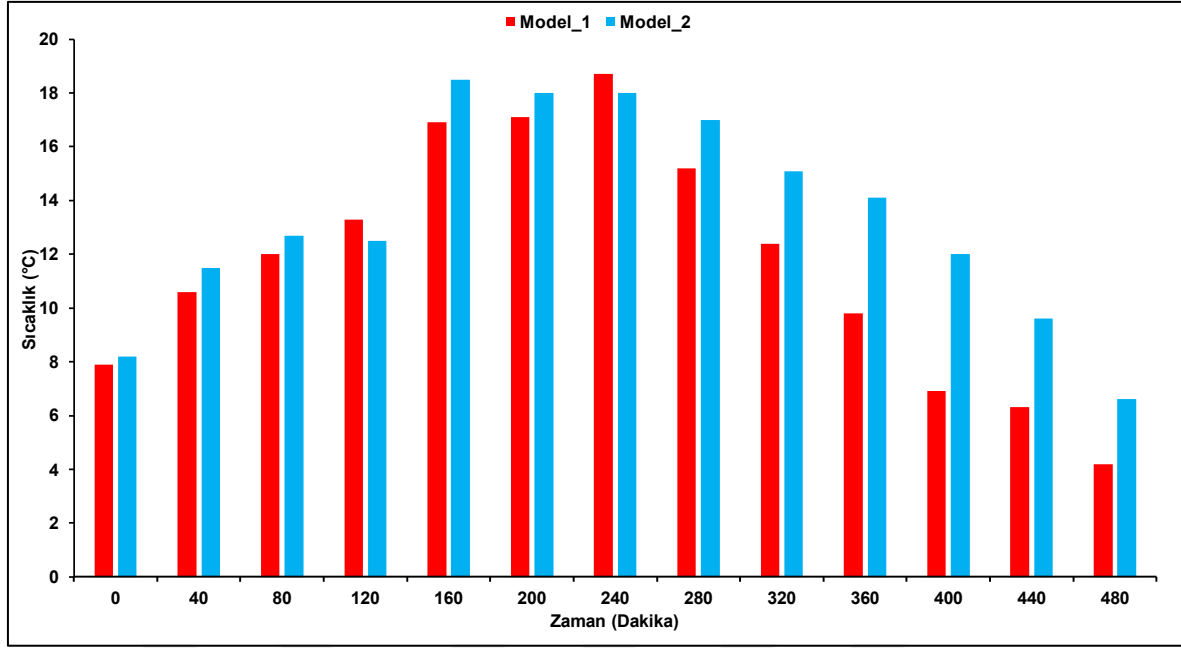
Isıl enerji depolamalı güneş kolektöründe ortalama hava debisi $0,0184 \text{ kg/s}$ olarak ölçülürken, standart tip güneş kolektöründe bu değer $0,0196 \text{ kg/s'ye}$ karşılık gelmektedir. Ayrıca kurutma odası için termal enerji depolama sisteminin toplam hava akış hızı $0,0098 \text{ kg/s}$ iken standart tip kurutma odası için $0,0148 \text{ kg/s}$ olarak elde edilmiştir. Sonuçlardan da görülebileceği gibi kolektörden kurutma odasına hava akışı sırasında hava akış hızlarında bir azalma olduğu görülmüştür. Hava debisinin kolektör performansının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan faktörlerden biri olduğu ve kolektör verimliliği gibi önemli performans parametrelerini doğrudan etkilediği sonucuna varılmıştır.



Şekil 7.1. Testler sırasındaki ortam sıcaklığı ve güneş ışıınımı değerleri

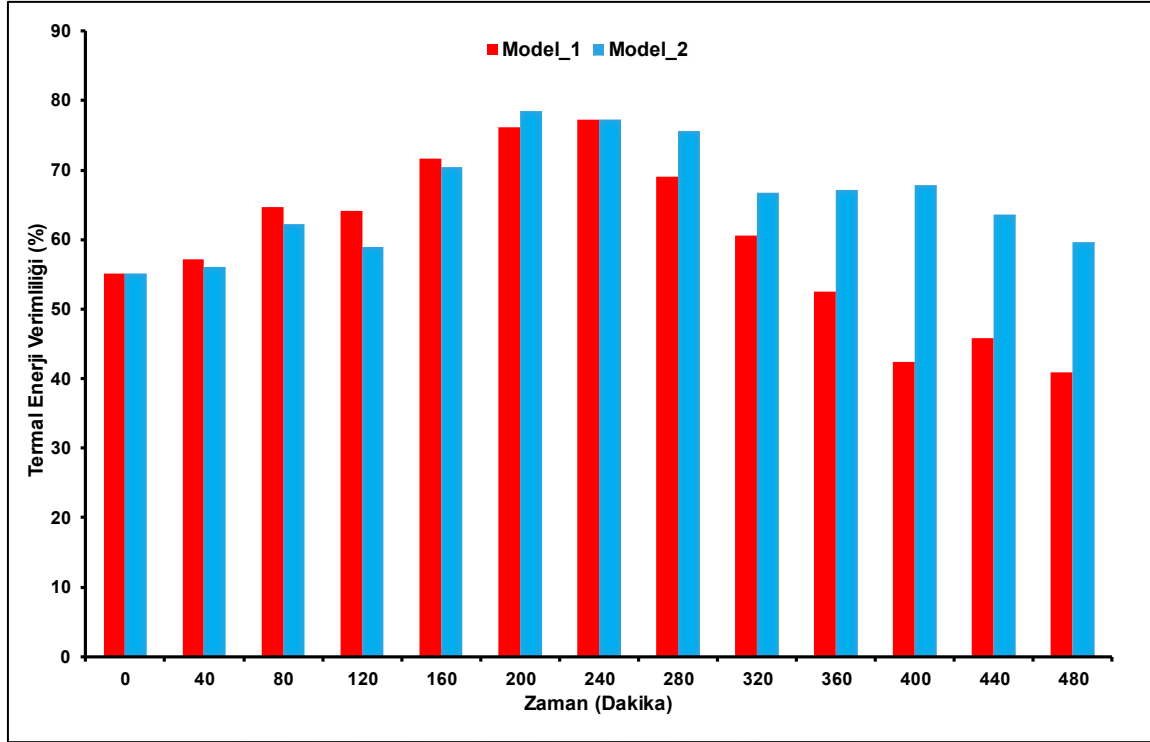
Şekil 7.1’de deney yerinde kolektör yüzeyine düşen güneş ışıının ve ortam sıcaklığının zaman içindeki değişimi gösterilmiştir. Maksimum güneş ışıınının deneyin 160. dakikasında ölçüldüğünü, dolayısıyla ortalama güneş ışıınının $873,38 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ olarak hesaplandığını göstermektedir. Bu bağlamda; deney sistemi için uygun çevre koşullarının bulunduğunu söyledi. Ayrıca deneyin 480. dakikasında minimum güneş ışıını gözlenmiş olup, gün içinde oluşan bulutlanma faktöründen dolayı 200. dakika civarında güneş ışıını değerlerinde dalgalanma olduğu tespit edilmiştir.

Benzer şekilde genel ortam sıcaklığı da $24,17^\circ\text{C}$ olarak hesaplanmıştır. Gün içinde maksimum ortam sıcaklığına 200. dakikada ulaşılmış olup, hava şartlarından dolayı aralıklarla dalgalanmalar yaşanmıştır. Minimum ortam sıcaklığı deneyin başlangıç saati olan 0. dakikada gözlenmiştir. Her iki PVT kurutucu da eş zamanlı aralıklarla incelendi ve aynı konuma yerleştirilmiştir. Bu konuda belirtilen sıcaklık ve güneş ışıını değerleri her iki kurutma sistemi için de geçerlidir.



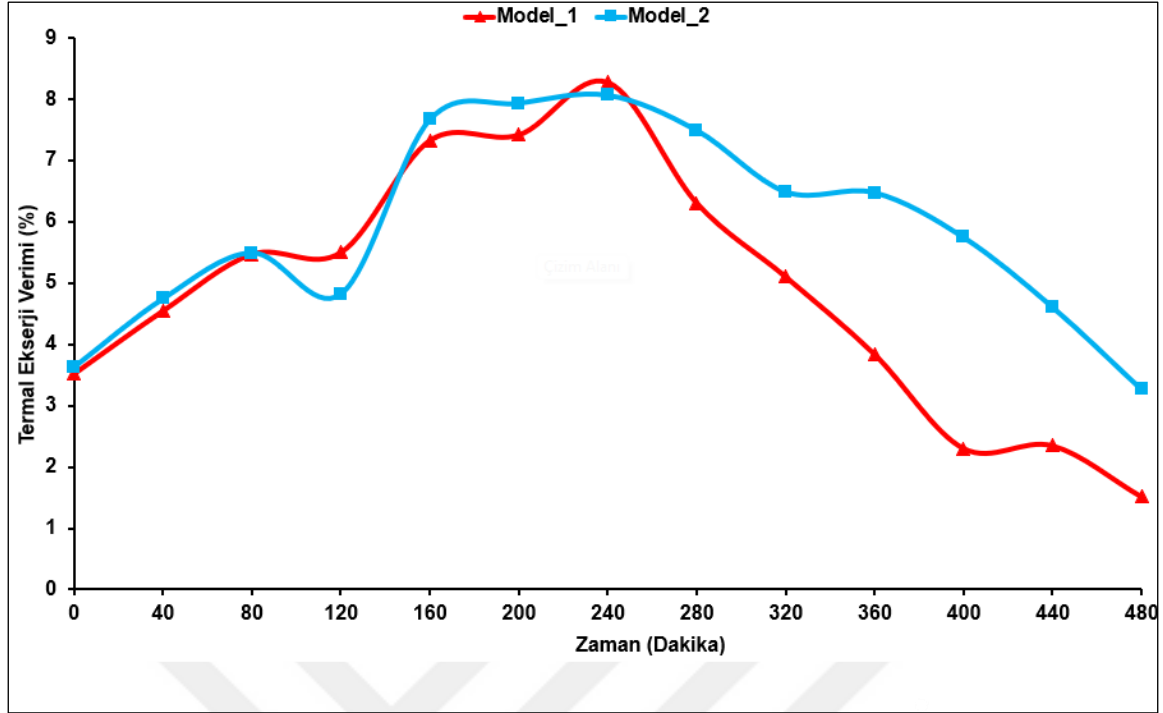
Şekil 7.2. PVT kolektör sıcaklık farkının zamana göre değişimi

Şekil 7.2’de test edilen fotovoltaik termal toplayıcılardan elde edilen hava çıkış sıcaklıkları farkının zaman içindeki değişimini gösterilmiştir. Bu anlamda MODEL_1 ve MODEL_2 için ortalama hava çıkış sıcaklıkları sırasıyla 35,82 °C ve 37,55 °C olarak hesaplanmıştır. Isıl enerji depolamalı sistemde hava çıkış sıcaklıklarının daha yüksek seviyelere ulaştığı açıktır. Ayrıca termal enerji depolama entegreli PVT sistemi başlangıçta standart tip PVT ile benzer performans gösterse de akşam saatlerine doğru güneş ışınımının azalmasıyla birlikte termal depolama ünitesi fonksiyonu ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla 280. dakika ile 480. dakikalar arasında MODEL_2 performansının MODEL_1 performansından daha yüksek olduğu görülüyor. Öte yandan MODEL_2 için maksimum çıkış sıcaklığı 160. dakikada ölçülürken, MODEL_1 için maksimum çıkış sıcaklığı 240. dakikaya karşılık geldi. Elde edilen sonuçlara göre güneş ışınımının azalması veya çevre koşullarının bozulması gibi durumlarda ortaya çıkan performans dalgalanmalarının önlenmesinde termal enerji depolama uygulamalarının büyük önem taşıdığı söylenebilir.



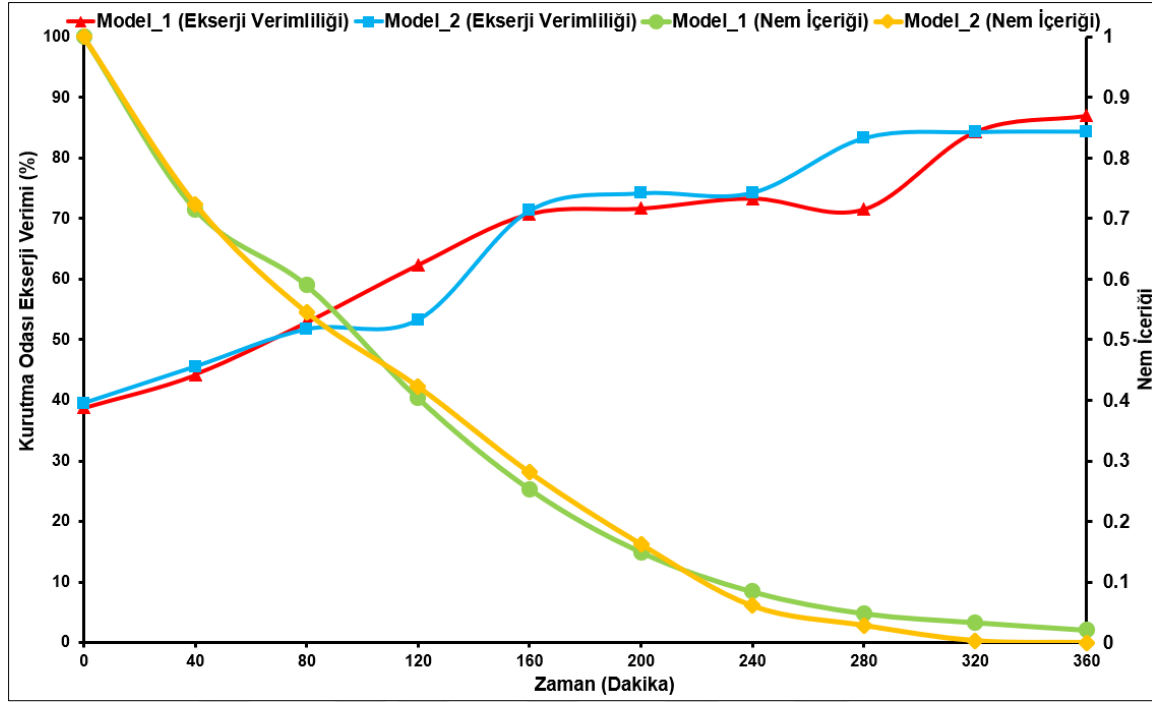
Şekil 7.3. PVT kolektör ısı verimliliğinin zaman içindeki değişimi

Termal verimlilik bir PVT sistemi için en önemli performans parametrelerinden biridir. Bu nedenle üretilen fotovoltaik termal kolektörün ısı verimi de araştırılması gereken bir kriterdir. Üretilen PVT sistemlerin ısı verimlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 7.3.'te sunulmuştur. Sonuç olarak MODEL_1 için ısı verim %40,94 ile %77,18 arasında, MODEL_2 için bu değer ise %55,11 ile %78,47 arasında hesaplanmıştır. Maksimum ısı verimin çok yakın olduğu bu iki sistemin minimum ısı verimleri arasında fark vardır, bunun nedeni ısı enerji depolama ünitesinin 280. dakikadan sonra hava çıkış sıcaklıklarına etki etmesidir. MODEL_1 için minimum termal enerji 480. dakikada ortaya çıkarken, MODEL_2 için bu değer 0. dakikada görülmüştür. Akademik alandaki benzer araştırmalarla karşılaştırıldığında bu çalışmadan elde edilen sonuçlarla benzer sonuçlara ulaşıldığı görülmüştür. Örneğin Gürel ve ark. (2022), düz ve zigzag kanatlı plaka sistemleri ile sıcaklık kontrollü akışkan yataklı güneş enerjili kurutucularla yaptıkları deneyler sonucunda geliştirdikleri sistemin ısı veriminin %64 olduğunu bildirmişlerdir [23]. Abuşka (2018), düz plaka ve konik yüzeyli güneş hava kolektörleri ile yaptığı deneylerde bu sistemlerin ısı verimliliğini düz plaka ve konik yüzey için sırasıyla %57,2 ve %63,2 olarak hesaplamıştır. [43]. Benli (2013); oluklu, trapezoidal, ters oluklu, ters trapezoidal ve düz tabanlı güneş enerjili hava ısıtıcılarını araştırmış ve sırasıyla %39, %33, %27, %17 ve %12'lik termal verimlilik elde etmiştir. [44].



Şekil 7.4. PVT toplayıcı ekserji veriminin zaman içindeki değişimi

Ekserji veriminin enerjinin kullanılabilirliği hakkında fikir verdiği bilinen bir gerçektir. Şekil 7.4. deneysel olarak analiz edilen PVT sistemlerinin ekserji verimi gösterilmiştir. Bu anlamda MODEL_1 ve MODEL_2 sistemlerinin genel ekserji verimi sırasıyla %5,72 ve %6,28 olarak hesaplanmıştır. Isıl verimliliğe benzer şekilde, ısı enerji depolama sistemi de ekserji verimine katkıda bulunmuştur. Ayrıca maksimum ekserji verimi değerleri 240. dakikada elde edilmiş ve MODEL_1'de daha yüksek değerlere ulaşılmıştır. Ancak minimum ekserji oranının MODEL_1'de daha düşük olması sistem performansını önemli ölçüde etkilemiştir. Benzer çalışmalarla bir karşılaştırma olarak Elsaid ve ark. (2022) girdap akışlı güneş enerjili hava ısıtıcısında yaptıkları deney ve analizler sonucunda sistemin ekserji verimini %1,30 olarak hesaplamışlardır [45]. Gürel ve ark. (2022), düz plakalı ve zigzag kanatlı plaka sistemli güneş enerjili kurutucunun ekserji verimini sırasıyla %7,2 ve %11,6 olarak hesaplamıştır [23]. Hassan ve ark. (2022), çift geçişli ve V-oluklu tip güneş enerjili kurutucunun performansını analiz etmiş ve sistemin ekserji verimini %6,6 olarak bildirmiştir [46].

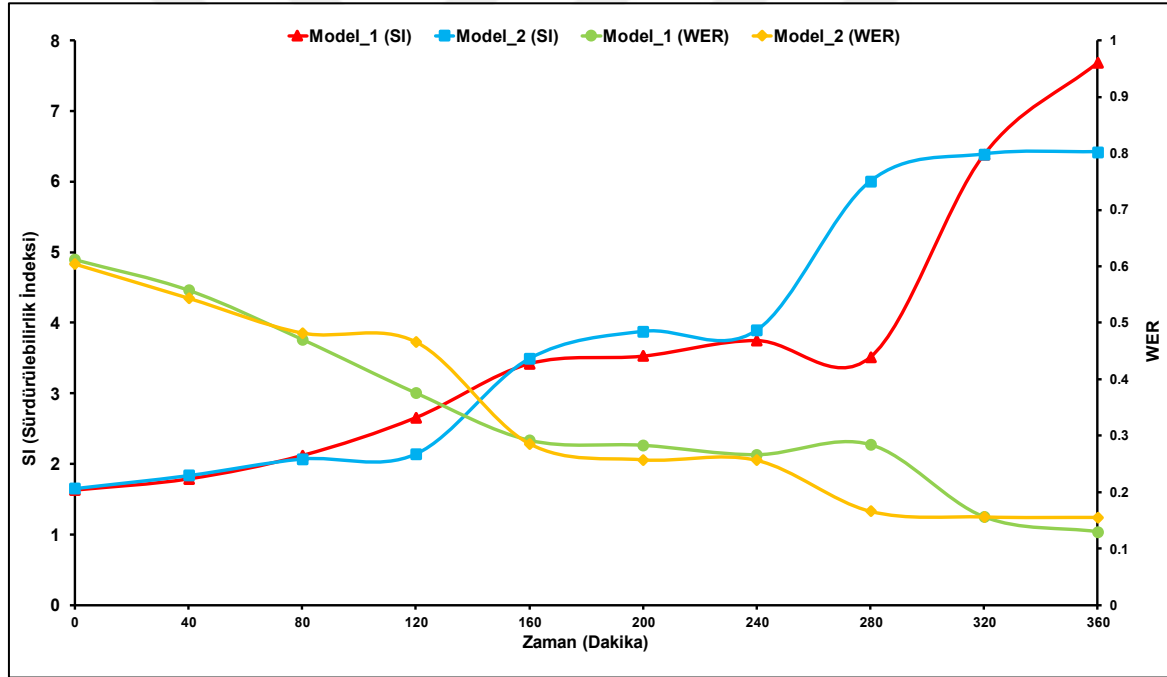


Şekil 7.5. Kurutma odasının ekserji verimindeki ve altın elma dilimlerinin nem içeriğindeki zamana bağlı değişim

Kurutma işlemi, kurutulacak numunenin nem içeriğinin uzaklaştırılmasıdır. Çift geçişli V-lu oluklu PVT kurutucularda kullanılan numunelerin nem içeriğinin zamana bağlı değişimi Şekil 7.5'te verilmiştir. Görüldüğü gibi ürünlerdeki nemin uzaklaştırılması işlemi MODEL_2 için 360. dakikada tamamlanmıştır. MODEL_2'de kurutma işleminin daha erken gerçekleşmiş olmasına karşın MODEL_1'de kurutma işleminin tamamlanması için kalan %1,4'lük nem miktarının da uzaklaştırılması gerekmektedir. Başlangıçta benzer bir trendle devam eden bu süreç, güneş ışınımının azalması sonucu hava çıkış sıcaklıklarının düşmesi nedeniyle MODEL_1'de daha düşük seviyelerde devam etmiştir. Buna göre termal enerji depolama ünitesinin verimliliği ortaya çıkmış ve kuruma hızına etki etmiştir. MODEL_2'de numunelerin nem içeriği 360. dakikada 0 iken MODEL_1 için bu oran 0,0860 olarak hesaplanmıştır.

Ayrıca şekil 7.5, geliştirilen PVT güneş enerjili kurutucuların kurutma odasının ekserji verimini göstermektedir. MODEL_1 ve MODEL_2 toplayıcıların kurutma odalarının genel ekserji verimi sırasıyla %65,69 ve %66,23 olarak elde edilmiştir. Şekil 7.5, ürünlerdeki nem içeriğinin azalmasıyla birlikte ekserji veriminin arttığını göstermektedir. Bu bakımdan her iki sistemde de maksimum ekserji verimi 320. dakika ile 360. dakika arasındaki sürede gözlemlenmiştir. Ek olarak termal enerji depolamalı sistemde daha istikrarlı bir performans

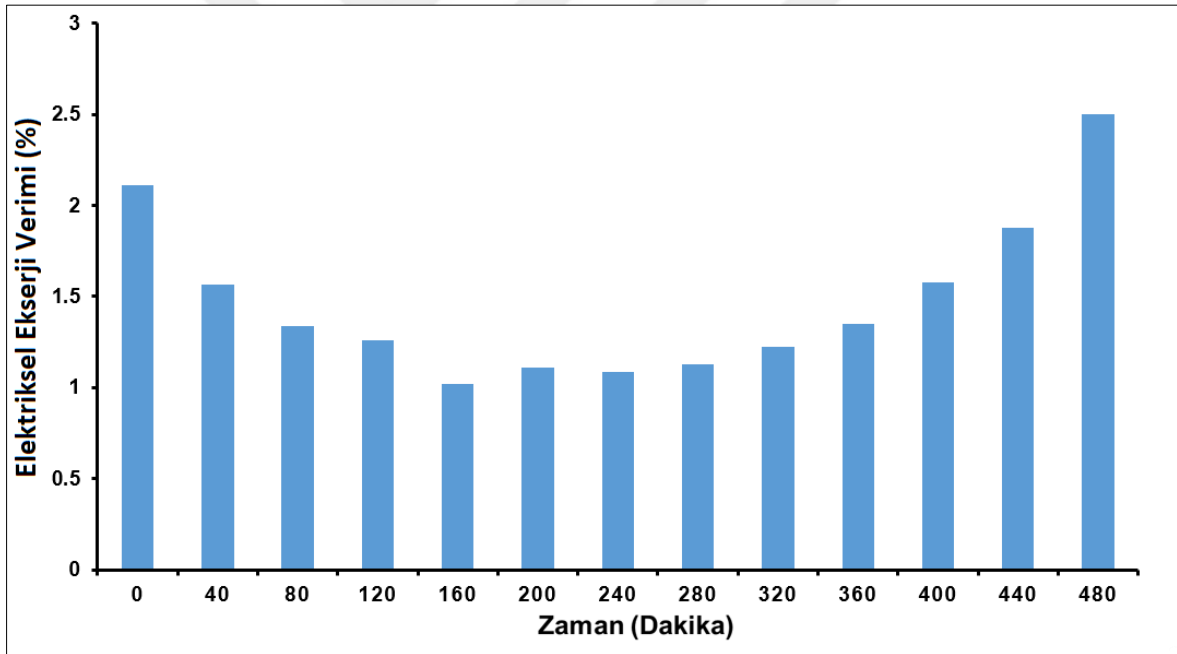
gözlemlenmiş ve dalgalanmaların çok daha az olduğu belirlenmiştir. Şekil 7.2’de gösterildiği üzere sistemin hava sıcaklığının artması ve buna bağlı olarak ortam havası ile hava sıcaklığı arasındaki farkın artması kurutma odasının ekserji verimini de etkilemiştir. Bu bakımdan maksimum ekserji verimi MODEL_1’de daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Önceki çalışmalarla karşılaştırıldığında Mugi ve ark. (2022), yaptıkları çalışmada doğal ve zorlamalı konveksiyonlu güneş enerjili kurutucuları incelemişler ve doğal konveksiyonlu kurutma odasının ekserji verimi %6,05 ile %82,79 arasında bulmuşlar, cebri konveksiyonlu kurutucuda ise bu değer %11,23 ile %93,23 arasında hesaplanmıştır. [47]. Benzer şekilde Mugi (2022), guava dilimlerinin pasif ve aktif modlu dolaylı güneş enerjili kurutucularda kurutulmasını incelemiş ve aktif modlu kurutucuda kurutma odasının ekserji verimi %7,21 ile %93,23 arasında, pasif mod kurutucuda %5,67 ile %89,59 arasında bulmuştur [48].



Şekil 7.6. Kurutma odasının SI ve WER değerlerinin zamanla değişimi

Sürdürülebilirlik indeksi (SI), sistemin ömrü için en önemli parametrelerden biridir ve ekserji verimi ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Bu açıdan ekserji verimi ile benzer bir eğilim göstermesi beklenmektedir. Ayrıca Şekil 7.6, geliştirilen PVT sistemlerinin kurutma odası sürdürülebilirlik indeksini göstermektedir. Ekserji veriminde olduğu gibi her iki modelde de nem içeriğinin azalmasıyla sistem sürdürülebilirlik indeksi arttığı görülmüştür. Ayrıca MODEL_1 için SI değeri 1,63 ile 7,68 arasında değişirken, MODEL_2 için bu oran 1,65 ile 6,42 arasında oluşmuştur. Ortalama SI değeri dalgalanmalar nedeniyle MODEL_2

için daha yüksek hesaplanırken, MODEL_1 ve ekserji verimi için maksimum SI değeri elde edilmiştir. Bu açıdan bakıldığında sistemin termal enerji depolama ünitesi ile daha stabil ve daha verimli bir kullanım sunduğu söylenebilir. Ayrıca WER (atık ekserji oranı) da doğrudan ekserjiye bağlı olarak değişen bir parametredir. Sistemde kaybedilen ekserji oranını gösterir ve bu bağlamda ekserji verimi ile ters orantı göstermesi beklenir. Benzer şekilde SI (sürdürülebilir endeks) ile ters orantılıdır. Şekil 7.6. bu durumu kanıtlamaktadır, SI değeri artmasına rağmen WER oranı düşmektedir. MODEL_1 için ortalama WER değeri 0,343, MODEL_2 için ise 0,337 olarak hesaplanıyor. Isı depolama ünitesinin önemi güneş ışıınımlarının azalmasıyla ortaya çıkmıştır. Bu bakımdan başlangıçta her iki sistemde de oldukça benzer eylemler ortaya çıkmıştır ancak güneş ışıınımlarının azalması ve gölgelerin ortaya çıkmasıyla birlikte modifiye ısı depolama sistemi aktif olarak çalışmaya başlamış ve standart sisteme göre daha olumlu sonuç alınmıştır.



Şekil 7.7. PV'lerin elektriksel ekserji verimindeki zaman içindeki değişim

Elektrik ekserjisi temel olarak güneş ışıınıma ve fotovoltaik panellerin doluluk faktörüne dayanmaktadır. Bu kapsamda mevcut deney sisteminde kullanılan fotovoltaik panellerin doluluk faktörü 0,8822 olarak elde edilmiştir. Her iki deney sisteminde de eşdeğer özelliklere sahip fotovoltaik panellerin kullanıldığı belirtilebilir; dolayısıyla Şekil 7.7, hem MODEL_1 hem de MODEL_2'nin elektriksel ekserji verimini göstermektedir. Deney sisteminde kullanılan fotovoltaik panellerin ortalama elektriksel ekserjisi 1.473 olarak

hesaplanmıştır. Ayrıca maksimum ekserji 480. dakikada elde edilirken ekserji değerlerinin 1.022 ile 2.500 arasında değiştiği belirlenmiştir.

Çizelge 7.1. Mevcut çalışmanın literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırılması

Farklı çalışmalar	Kurutma tipi	Termal verimlilik	Kurutma süresi (dk)
Çiftçi ve ark. (2021) [21]	Dikey hibrit PV-T güneş enerjili kurutucu	%47.46 54.86 (kanatsız) %50.25- 58.16 (kanatlı)	225–330 (kanatsız) 195–285 (kanatlı)
Tuncer ve ark. (2020) [24]	Dört geçişli güneş enerjili kurutucu	%71.63 –%80.66	180–330
Gürel ve ark. (2022) [23]	Sıcaklık kontrollü akışkan yataklı solar kurutucu	%64	480
Murali ve ark. (2022) [18]	Güneş tüneli kurutucusu	-	360
Sözen ve ark. (2021) [49]	Tüp tipi emicili dolaylı güneş enerjili kurutucu	%73.30 –%56.32	180–300
Sözen ve ark. (2020) [50]	Demir ağırlı tüp tipi güneş enerjili kurutucu	%67.69 –%59.94	195–135
Khanlari ve ark. (2020) [51]	Tüp tipi sera kurutucusu	%45.56–%56.77	255 (15 kg/s dk.)
Tiwari ve Tiwari (2016) [27]	PV-T tek eğimli çatı entegre sera güneş kurutucusu	%89.44 (Doğal) % 65.70 (Zorlanmış)	-
Benli (2013) [44]	Oluklu, trapezoidal (yamuk) kurutma	%39, %33	-
Abuşka (2018) [43]	Düz plaka ve konik yüzeyli kurutma	%57,2 ve %63,2	-



8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölümde geliştirilen fotovoltaiik termal kurutucuların analizlerinden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Bu çalışmada temel olarak çift geçişli V-oluklu tip bir fotovoltaiik termal kurutucu geliştirilmiş ve deneysel olarak incelenmiştir. Her iki kurutucu da V-oluklu tipte emici yüzeye sahiptir ancak kurutucu kolektörlerden birinde, kolektör içindeki fotovoltaiik panele parafin bazlı termal enerji depolama ünitesi eklenmiştir. Üretilen kurutma odasında kurutulacak ürün olarak altın elma dilimleri seçilmiştir. Deney üç kere tekrar edilmiş olup sonuçların değişmediği gözlemlenmiştir. Ek olarak elma dilimlerinin ölçümü esnasında kısa süre içerisinde de olsa kurutma odasından dış ortama çıkarıldığında havadan nem alma olasılığına karşı difüzyon ihmal edilmiştir. Grafikler, ölçülen bu değerler ışığında ortalama olarak bulunmuştur. İki kurutucunun deneysel analizleri aynı çevre koşullarında belirli periyotlarda ölçümler alınarak gerçekleştirilmiştir. Mevcut çalışmadan elde edilen öne çıkan sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Güneş enerjili kurutucularda kullanılan PVT kolektörlerden ortalama hava çıkış sıcaklığı MODEL_1 için 35,82°C iken MODEL_2 için bu değer 37,55°C'dir.
- Geliştirilen PVT kurutucuların kolektör verimi MODEL_1 için %40,94 ile %77,18 arasında değişirken, MODEL_2 için %55,11 ile %78,47 arasında elde edilmiştir. Ayrıca ortalama ekserji verimi MODEL_1 için %5,72, MODEL_2 için ise %6,28 olarak hesaplanmıştır.
- Numunenin kurutma işlemi MODEL_2'de 360. dakikada gerçekleştirildi ancak MODEL_1'de 360. dakikada tamamlanamamıştır.
- Kurutma odasının genel ekserji verimi MODEL_1 için %65,69 olarak hesaplanırken, bu parametre MODEL_2 için %66,23 olarak hesaplanmıştır.
- Kurutma odası SI değerleri MODEL_1 ve MODEL_2 için sırasıyla 1,63-7,68 ve 1,65-6,42 aralığında bulunmuştur.

Yapılan bu çalışmada incelenen fotovoltaiik termal kurutucunun kullanılabilirliği test edilmiştir. Yapılan testler sonucunda endüstriyel anlamda gelişime açık bir model olduğu verilen deney sonuçlarında görülmüştür. Bu sonuçlara bağlı olarak farklı emici plaka geometrileri, Isı depolama ünitesinin entegrasyonu veya akışkanın temas ettiği yüzey alanının artmasıyla birlikte termal verimin artabileceği pek çok çalışmada sunulmuştur.

Ayrıca çalışmada kullanılmış olan termal enerji depolama ünitesinin yanı sıra çeşitli modifikasyonlar ile mevcut sistemin performansının daha fazla artırabileceği öngörülmüş olup sistem performansının daha da iyileştirilebilmesi amacıyla yapılan farklı değişikliklerin sisteme pozitif etkide bulunacağı belirtilmiştir.



KAYNAKLAR

1. Kovacı, T. (2019). *Dondurarak kurutma sistemi tasarımı ve tıbbi aromatik ürünlerin kurutma parametrelerinin araştırılması*, Doktora Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Isparta.
2. Özgen, F. (2007). *Yutucu plakası silindirik teneke kutulardan yapılmış bir havalı güneş kolektörünün ısı performansının deneysel olarak araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elâzığ.
3. Tuncer, A.D. (2018). *Yeni tip havalı bir güneş kolektörünün tasarımı imalatı ve performans analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
4. Kothari, D. P., Singal, K. C. and Ranjan, R. (2008) Renewable Energy Sources and Emerging Technologies. 30-109.
5. Kalogirou, S. (2003). The potential of solar industrial process heat applications. *Applied Energy*, 76(4), 337-361.
6. İnternet: Düz Yüzeyli Güneş Enerjisi Kolektörleri. URL: <https://depo.btu.edu.tr/dosyalar/makine/Dosyalar/yenilenebilir%20enerji%20yeni%20format.pdf>, son erişim tarihi: 22.03.2024
7. Çağlar, A. ve Talay, İ. B. (2019). Tasarım parametrelerinin parabolik oluk tipi bir güneş kolektörünün performansına etkisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 15-24.
8. İnternet: Güneş kolektörleri URL: <https://depo.btu.edu.tr/dosyalar/makine/Dosyalar/Vakum%20T%C3%BCpl%C3%BC%20G%C3%BCne%C5%9F%20Kollekt%C3%B6r%20Deney%20F%C3%B6y%C3%BC%20%281%29%284%29.pdf>, Son Erişim Tarihi: 17.04.2024
9. Yavuz, a. h. (2020). Isı borulu vakum tüplü termoelektrik güneş jeneratörü tasarımı ve uygulaması. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 180-185.
10. Kalogirou, S. A. (2009). Chapter three-Solar Energy Collectors. *Solar Energy Engineering*, 121-217.
11. Demir, F. (2021). *Batman ili şartlarında güneş enerjisi destekli kurutma sisteminde kurutma parametrelerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi, Batman.
12. Budagov, H. (2018). *Isı borulu güneş kolektörü ve ısı pompalı sistemin bir yerde kullanılabileceği kurutma sisteminin tasarımı ve imalatı*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
13. Ongun, G.K. (2022). *Kanlıca mantarının sıcak havalı kurutma ve dondurarak kurutulmasının deneysel karşılaştırılması*, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi.

14. Alhammadiy, A. (2022). *Dilimlenmiş cennet hurmasının (diospyros kaki) dondurarak kurutma kinetiğinin belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük.
15. Aktaş, M., İlbaş, M., YALÇIN, A., & Şahin, M. (2013). Kızılötesi ışınlı bir kurutucuda kuruma davranışlarının deneysel incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(4), 767-775.
16. Arslan, E. (2020). *Yeni nesil güneş enerjili fotovoltaiik-termal bir kurutma sisteminin tasarımı ve analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
17. Acar, B. (2011). *Safran çiçeğinin dondurarak kurutulması*, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük.
18. Murali, S., Alfiya, P. V., Delfiya, D. A., Harikrishnan, S., Kunjulakshmi, S., & Samuel, M. P. (2022). Performance evaluation of PV powered solar tunnel dryer integrated with a mobile alert system for shrimp drying. *Solar Energy*, 240, 246-257.
19. Azam, M. M., Eltawil, M. A., & Amer, B. M. (2020). Thermal analysis of PV system and solar collector integrated with greenhouse dryer for drying tomatoes. *Energy*, 212, 118764.
20. Samimi-Akhijahani, H., & Arabhosseini, A. (2018). Accelerating drying process of tomato slices in a PV-assisted solar dryer using a sun tracking system. *Renewable Energy*, 123, 428-438.
21. Çiftçi, E., Khanlari, A., Sözen, A., Aytaç, İ., & Tuncer, A. D. (2021). Energy and exergy analysis of a photovoltaic thermal (PVT) system used in solar dryer: A numerical and experimental investigation. *Renewable Energy*, 180, 410-423.
22. Afshari, F., Khanlari, A., Tuncer, A. D., Sözen, A., Şahinkesen, İ., & Di Nicola, G. (2021). Dehumidification of sewage sludge using quonset solar tunnel dryer: An experimental and numerical approach. *Renewable Energy*, 171, 784-798.
23. Gürel, A. E., Ağbulut, Ü., Ergün, A., Ceylan, İ., Sözen, A., Tuncer, A. D., & Khanlari, A. (2022). A detailed investigation of the temperature-controlled fluidized bed solar dryer: a numerical, experimental, and modeling study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 49, 101703.
24. Tuncer, A. D., Sözen, A., Khanlari, A., Amini, A., & Şirin, C. (2020). Thermal performance analysis of a quadruple-pass solar air collector assisted pilot-scale greenhouse dryer. *Solar Energy*, 203, 304-316.
25. Ziaforoughi, A., & Esfahani, J. A. (2016). A salient reduction of energy consumption and drying time in a novel PV-solar collector-assisted intermittent infrared dryer. *Solar Energy*, 136, 428-436.
26. VeeramaniPriya, E., & Sundari, A. U. (2021). Performance evaluation of hybrid photovoltaic thermal (PVT) solar dryer for drying of cassava. *Solar Energy*, 215, 240-251.
27. Tiwari, S., & Tiwari, G. N. (2016). Thermal analysis of photovoltaic-thermal (PVT) single slope roof integrated greenhouse solar dryer. *Solar Energy*, 138, 128-136.

28. Tiwari, S., & Tiwari, G. N. (2017). Energy and exergy analysis of a mixed-mode greenhouse-type solar dryer, integrated with partially covered N-PVT air collector. *Energy*, 128, 183-195.
29. Selimefendigil, F., & Şirin, C. (2022). Energy and exergy analysis of a hybrid photovoltaic/thermal-air collector modified with nano-enhanced latent heat thermal energy storage unit. *Journal of Energy Storage*, 45, 103467.
30. Chaatouf, D., Salhi, M., Raillani, B., Amraoui, S., & Mezrhab, A. (2021). Assessment of a heat storage system within an indirect solar dryer to improve the efficiency and the dynamic behavior. *Journal of Energy Storage*, 41, 102874.
31. Andharia, J. K., Markam, B., Dzhonova, D., & Maiti, S. (2022). A comparative performance analysis of sensible and latent heat based storage in a small-scale solar thermal dryer. *Journal of Energy Storage*, 45, 103764.
32. Abi Mathew, A., & Thangavel, V. (2021). A novel thermal energy storage integrated evacuated tube heat pipe solar dryer for agricultural products: Performance and economic evaluation. *Renewable Energy*, 179, 1674-1693.
33. Lamrani, B., & Draoui, A. (2020). Modelling and simulation of a hybrid solar-electrical dryer of wood integrated with latent heat thermal energy storage system. *Thermal Science and Engineering Progress*, 18, 100545.
34. Cetina-Quiñones, A. J., López, J. L., Ricalde-Cab, L., El Mekaoui, A., San-Pedro, L., & Bassam, A. (2021). Experimental evaluation of an indirect type solar dryer for agricultural use in rural communities: Relative humidity comparative study under winter season in tropical climate with sensible heat storage material. *Solar Energy*, 224, 58-75.
35. Berto, A., Azzolin, M., & Del Col, D. (2021). Experimental and numerical study of an evaporator with integrated latent heat storage for a compressed air dryer. *Applied Thermal Engineering*, 195, 117170.
36. Kumar, D., Mahanta, P., & Kalita, P. (2020). Energy and exergy analysis of a natural convection dryer with and without sensible heat storage medium. *Journal of Energy Storage*, 29, 101481.
37. Kumar, D., Mahanta, P., & Kalita, P. (2022). Performance analysis of natural convection biomass operated grain dryer coupled with latent heat storage medium. *Materials Today: Proceedings*, 58, 902-905.
38. Chaouch, W. B., Khellaf, A., Mediani, A., Slimani, M. E. A., Loumani, A., & Hamid, A. (2018). Experimental investigation of an active direct and indirect solar dryer with sensible heat storage for camel meat drying in Saharan environment. *Solar Energy*, 174, 328-341.
39. Rabha, D. K., & Muthukumar, P. (2017). Performance studies on a forced convection solar dryer integrated with a paraffin wax-based latent heat storage system. *Solar Energy*, 149, 214-226.

40. Shalaby, S. M., & Bek, M. A. (2014). Experimental investigation of a novel indirect solar dryer implementing PCM as energy storage medium. *Energy Conversion and Management*, 83, 1-8.
41. Agarwal, A., & Sarviya, R. M. (2016). An experimental investigation of shell and tube latent heat storage for solar dryer using paraffin wax as heat storage material. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(1), 619-631.
42. Lamrani, B., & Draoui, A. (2020). Modelling and simulation of a hybrid solar-electrical dryer of wood integrated with latent heat thermal energy storage system. *Thermal Science and Engineering Progress*, 18, 100545.
43. Abuşka, M. (2018). Energy and exergy analysis of solar air heater having new design absorber plate with conical surface. *Applied Thermal Engineering*, 131, 115-124.
44. Benli, H. (2013). Experimentally derived efficiency and exergy analysis of a new solar air heater having different surface shapes. *Renewable Energy*, 50, 58-67.
45. El-Said, E. M., Abou Al-Sood, M. M., Elsharkawy, E. A., & Abdelaziz, G. B. (2022). Tubular solar air heater using finned semi-cylindrical absorber plate with swirl flow: experimental investigation. *Solar Energy*, 236, 879-897.
46. Hassan, A., Nikbahkt, A. M., Welsh, Z., Yarlagadda, P., Fawzia, S., & Karim, A. (2022). Experimental and thermodynamic analysis of solar air dryer equipped with V-groove double pass collector: Techno-economic and exergetic measures. *Energy Conversion and Management: X*, 16, 100296.
47. Mugi, V. R., Gilago, M. C., & Chandramohan, V. P. (2022). Energy and exergy investigation of indirect solar dryer under natural and forced convection while drying muskmelon slices. *Energy Nexus*, 8, 100153.
48. Mugi, V. R., & Chandramohan, V. P. (2022). Energy, exergy, economic and environmental (4E) analysis of passive and active-modes indirect type solar dryers while drying guava slices. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102250.
49. Sözen, A., Kazancıoğlu, F. Ş., Tuncer, A. D., Khanlari, A., Bilge, Y. C., & Gungor, A. (2021). Thermal performance improvement of an indirect solar dryer with tube-type absorber packed with aluminum wool. *Solar Energy*, 217, 328-341.
50. Sözen, A., Şirin, C., Khanlari, A., Tuncer, A. D., & Gürbüz, E. Y. (2020). Thermal performance enhancement of tube-type alternative indirect solar dryer with iron mesh modification. *Solar Energy*, 207, 1269-1281.
51. Khanlari, A., Sözen, A., Şirin, C., Tuncer, A. D., & Gungor, A. (2020). Performance enhancement of a greenhouse dryer: Analysis of a cost-effective alternative solar air heater. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119672.



Gazili olmak ayrıcalıktır