



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



## ***Güneş enerjisi destekli enerji depolamalı yeni nesil eko kurutucu tasarımı***

## ***New generation eco dryer design with solar energy assisted energy storage***

**Yazar(lar) (Author(s)):** Zafer DENİZ<sup>1</sup>, Mustafa AKTAŞ<sup>2</sup>, Yaren GÜVEN<sup>3</sup>, Buğra ŞENSOY<sup>4</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-8433-3598

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-1187-5120

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0003-0732-4692

ORCID<sup>4</sup>: 0000-0002-7350-9540

**To cite to this article:** Deniz Z., Aktaş M., Güven Y. and Şensoy B., “Güneş enerjisi destekli enerji depolamalı yeni nesil eko kurutucu tasarımı”, *Journal of Polytechnic*, 27(6): 2297-2312, (2024).

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz:** Deniz Z., Aktaş M., Güven Y. ve Şensoy B., “Güneş enerjisi destekli enerji depolamalı yeni nesil eko kurutucu tasarımı”, *Politeknik Dergisi*, 27(6): 2297-2312, (2024).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.1443193

# Güneş Enerjisi Destekli Enerji Depolamalı Yeni Nesil Eko Kurutucu Tasarımı

## New Generation Eco Dryer Design with Solar Energy Assisted Energy Storage

### Önemli Noktalar (Highlights)

- ❖ Karbon salımının azaltılması. / Reducing carbon emissions.
- ❖ Sürdürülebilir bir kurutucu tasarımı. / Designing a sustainable dryer.
- ❖ Güneş enerjisinin depolanması ile kesintisiz kurutmanın sağlanması. / Providing uninterrupted drying by storing solar energy.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Farklı modların kullanımı ile enerjinin etkin kullanıldığı sürdürülebilir bir sistem tasarlanmıştır. / A sustainable system that uses energy efficiently with the use of different modes was designed.



Şekil. Tasarlanan sistemin şematik çıktıları / Figure. Schematic outputs of the designed system

### Amaç (Aim)

Güneş enerjili kurutma sisteminde devamlılığı sağlamak ve enerji verimliliğini artırmak amacıyla bu çalışma gerçekleştirilmiştir. / This study was carried out to ensure continuity and increase energy efficiency in the solar drying system.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Güneş enerjisi ile kurutmanın devamlılığını sağlayabilecek, enerji depolamalı, hem elektrik hem ısı üretebilen bir kurutucu tasarlanmıştır. / A dryer with energy storage, which can produce both electricity and heat, was designed to ensure the continuity of drying with solar energy.

### Özgünlük (Originality)

Güneş enerjisi ile kendi enerjisini üreten, farklı modlarda çalışan yeni bir tip kurutucu tasarlanmıştır. / A new type of dryer that generates its own energy with solar energy and operates in different modes was designed.

### Bulgular (Findings)

Konvansiyonel enerji kaynaklarına olan bağımlılığı azaltacak ve güneşin olmadığı zamanlarda çalışabilecek yeni bir tasarım ortaya konmuştur. / A new design was put forward that will reduce dependence on conventional energy sources and can operate when the sun is not shining.

### Sonuç (Conclusion)

Isı geri kazanım sistemi ile enerji tasarrufu sağlayan, karbon salımının azalmasına destek veren bir tasarım yapılmıştır. / A design that saves energy and supports the reduction of carbon emissions was made with the heat recovery system.

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

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

# Güneş Enerjisi Destekli Enerji Depolamalı Yeni Nesil Eko Kurutucu Tasarımı

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Zafer DENİZ<sup>1</sup>, Mustafa AKTAŞ<sup>2</sup>, Yaren GÜVEN<sup>2\*</sup>, Buğra ŞENSOY<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği A.B.D., Gazi Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 27.02.2024 ; Kabul/Accepted : 27.03.2024 ; Erken Görünüm/Early View : 28.03.2024)

## ÖZ

Gerçekleştirilen bu çalışmada sadece güneş enerjisinin kullanıldığı, enerjinin depolandığı ve sistemdeki atık ısının geri kazanıldığı bir eko kurutma sistemi tasarlanmıştır. Kurutulacak ürün türüne göre sıcaklık ve bağıl nem kontrolü yapılarak çalışma modunun belirlendiği bu tasarımda, belirlenen mod ile üründe oluşabilecek kusurlar ve kurutma süresi azaltılabilecektir. Farklı çalışma modları ile güneş enerjisinden maksimum fayda sağlanacak, güneş enerjisinden yararlanılmadığı zamanlarda ise depolanan enerjinin kullanımı ile hem enerji tasarrufu sağlanacak hem de CO<sub>2</sub> salımı azaltılacaktır. Yeni nesil eko kurutma sistemi ile kurutma işleminin devamlılığı sağlanarak, atık ısı desteğiyle enerji verimliliği arttırılacaktır. Güneşin kesikli olduğu zamanlarda da kurutma devam ettirilerek güneş enerjisi desteğiyle arzu edilen kalitede kurutulmuş ürün elde edilebilecektir. Çevreci ve sürdürülebilir bir yapıya sahip olan yeni nesil eko kurutucu, karbon ayak izini küçülterek Paris İklim Anlaşması'nın hedeflerinin gerçekleştirilmesine katkı sağlayacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Güneş enerjisi, kurutma, enerji depolama, ısı geri kazanımı, enerji verimliliği.

## New Generation Eco Dryer Design with Solar Energy Assisted Energy Storage

### ABSTRACT

In this study, an eco-drying system is designed in which only solar energy is used, energy is stored and waste heat in the system is recovered. In this design where the operating mode is determined by controlling the temperature and relative humidity according to the type of product to be dried, the defects that may occur in the product and the drying time can be reduced with the determined mode. With different operating modes, maximum benefit from solar energy will be provided, and when solar energy is not utilized, both energy saving and CO<sub>2</sub> emissions will be reduced by using the stored energy. With the new generation eco-drying system, the continuity of the drying process will be ensured and energy efficiency will be increased with waste heat support. By continuing the drying process even when the sun is intermittent, the desired quality of the dried product can be obtained with the support of solar energy. The new generation eco dryer, which has an environmentally friendly and sustainable structure, will contribute to the realization of the goals of the Paris Climate Agreement by reducing the carbon footprint.

**Keywords:** Solar energy, drying, energy storage, heat recovery, energy efficiency.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji, günlük yaşamın her anında insanın en önemli gereksinimlerinden olmuştur. Bu gereksinim de konvansiyonel ya da yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Enerji ihtiyacının büyük bölümünü karşılayan konvansiyonel kaynak temelli fosil yakıtların miktarının git gide azalmasının yanı sıra fosil yakıt kullanımının olumsuz etkileri nedeniyle yeryüzünde sıcaklıkların olağan dışı artması, buzulların erimesi, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> ve SO<sub>x</sub> emisyonlarındaki artış sebebiyle hava kirliliği yaşanması gibi istenilmeyen durumlar meydana gelmektedir. Tüm bu sebeplerle insanlar temiz, çevreci ve sürdürülebilir olan yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim göstermektedir. Bu kaynakların başında da yenilenebilir enerji kaynaklarının temeli olan güneş enerjisi gelmektedir [1].

Güneş enerjisi doğa dostu olmanın yanı sıra elektrik ve ısı enerjisi üretimini birlikte karşılayabilen bir kaynak olduğundan pek çok farklı şekilde kullanımı

mümkündür. En sık kullanılan yöntem güneşten gelen ışınların güneş hücreleri ile tutulup elektrik akımına dönüştürüldüğü fotovoltaik (PV) sistemlerdir. PV sistemlerin elektrik üretim verimleri panel sıcaklığı artışıyla olumsuz etkilenmektedir. Sıcaklığın düşürülebilmesi için PV/T (fotovoltaik/termal) sistemler geliştirilmiş, bu sayede panel sıcaklığı düşürülerek hem elektriksel verim artırılmış hem de panel yüzeyinin soğutulması sürecinde elde edilen enerji çeşitli ısıtma uygulamalarında kullanılmıştır. PV/T sistemler; PV/T sıvı kolektörler, PV/T havalı kolektörler, ısı borulu PV/T kolektörler ve PV/T-FDM kolektörler olarak dört sınıfa ayrılmaktadır [2].

#### 1.1. PV/T Havalı Kolektörler (PV/T Air Collectors)

Fotovoltaik sistemlerin hava ile soğutulması prensibine göre çalışan bu kolektörlerin verimleri tasarım bazında değişiklik göstermekte olup, ortalama verimlerinin %20-%40 arasında olduğu görülmektedir. Maliyetlerinin daha düşük olması ve yapısının basitliği sebebiyle

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : yarenguven@gazi.edu.tr

kullanımları yaygındır [2]. Güneş enerjisini ısıya çeviren ve akışkan olarak hava kullanan bu sistemler, ara bir akışkan kullanımı olmadan ısıyı direkt olarak havaya aktarırlar. Daha çok gıda ürünlerinin kurutulması, seraların ısıtılması, binaların soğutulması ve iklimlendirilmesi gibi alanlarda kullanımları yaygındır [3].

### 1.2. PV/T Sıvı Kolektörler (PV/T Liquid Collectors)

Hava soğutmalı PV/T kolektörlerin ardından en yaygın kullanılan kolektör tipi olup, havalı kolektöre kıyasla daha yüksek verimliliğe sahiptir. Sıvıların ısı iletkenliklerinin yüksek, hacimlerinin ise az olması bu kolektörleri avantajlı kılmaktadır. Kullanılan akışkan tipine göre de verimleri değişiklik göstermektedir [2].

### 1.3. Isı Borulu PV/T Kolektörler (Heat Tube PV/T Collectors)

Isı borusu ve güneş kolektörünün birleşimiyle oluşturulan bu kolektörler, soğuk havalarda su donabileceği için tercih edilmektedir [4].

### 1.4. PV/T-FDM Kolektörler (PV/T-FDM Collectors)

Faz değiştiren malzemeler (FDM), enerjiyi depolama amacıyla kullanılmaktadır. Bu malzemelere ısı

verilirse füzyon gizli ısını kullanarak katı halden sıvı hale geçerler. Isı verilmediği takdirde ise, FDM'nin depoladığı enerjiyi bırakarak ve öz fazına dönerler. Gizli füzyon ısı, ısı iletkenlik ve kimyasal kararlılık gibi özelliklerinin yüksek olması sebebiyle FDM'ler PV modül soğutulmasında kullanılabilir [2].

Enerji depolama, enerjinin gerektiği durumlarda kullanılması amacıyla belirli bir süre saklanması işlemidir. Güneş enerjisinin gündüz depolanarak güneş ışınımının olmadığı zamanlarda kullanılması bu işleme örnek gösterilebilir [5]. Şekil 1'de yer alan grafikte, enerji depolama ile ilgili farklı yöntemler sunulmuştur [6].

### 1.5. Termal Enerji Depolama (Thermal Energy Storage)

Termal enerji depolama; gizli ısı depolama, duyu ısı depolama ve termokimyasal depolama olarak üç farklı yolla yapılabilir. Madde içerisinde faz değişimini kullanarak yüksek enerji depolamayı sağlayan bu yöntem, üç farklı yöntem arasındaki en etkili yöntemdir. FDM'ler, gizli ısıyı depolama yeteneğine sahip organik ya da inorganik malzemelerdir [8].

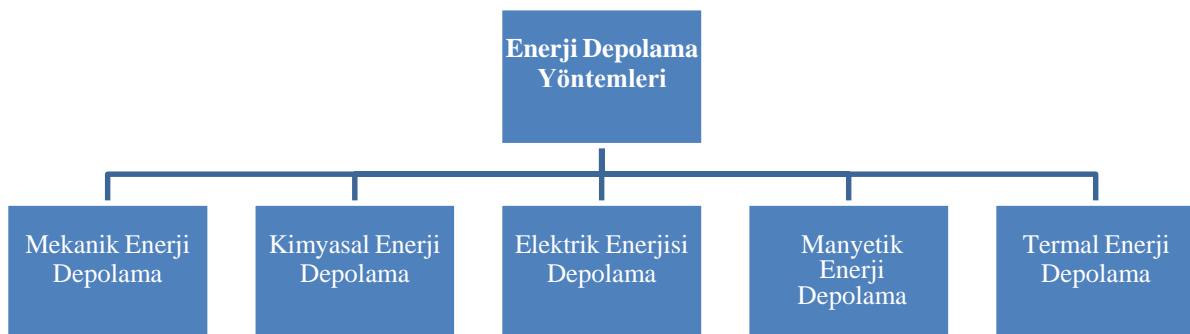
Faz değiştirirken ortamdaki enerjiyi toplayarak, depoladığı bu enerjiyi bırakır ve ısı regülasyonu sağlanır. Bu malzemeler pek çok farklı alanda kullanılabilirler [9].

## 2. KURUTMA (DRYING)

Ürün neminin istenilen seviyede alınması işlemine kurutma denir. Sanayinin pek çok alanında, temel işlemlerden biri olan kurutma, günlük hayatta da önemli bir yere sahiptir. Gıda ürünlerinin besin değerlerini koruyarak uzun süre saklanması ve korunması gerekir. Kurutulan ürünün besin değerinde azalma olmamalı, görüntüsü ve tadı güzel olmalı, kolay çignenebilmelidir. Kurutma işlemi ile besinlerdeki su yüzdesi düşürülerek meyve asidi, aminoasit gibi zararlı enzimlerin faaliyetleri de önlenmektedir. Kurutulan ürünün muhafazasında sıcaklık, ışık, bağıl nem, paketleme şekli ve depolama koşulları etkili olmaktadır. Kurutma esnasında kabuk sertleşmesi, patlak veya yarı oluşması, kararma, büzülme, aroma maddelerinin kaybolması gibi olumsuzlukların önüne geçmek için kurutma koşulları iyi ayarlanmalı, düşük sıcaklıkta hızlı kurutma yapılmalıdır. Kurutma hızı arttıkça kurutma süresi kısalmaktadır. Bu yüzden kurutma hızı optimum değerde tutulmalıdır [10]. Kurutma işlemi için farklı tasarımlar mevcuttur. Mekanik kurutma, sıvı alma işlemi olup uygun maliyetli olmasına rağmen bazı malzemeler bu kurutma türüne uygun olmadığı için termal kurutma sistemleri tercih edilmektedir [11].

Termal kurutma sistemlerinden biri olan güneş enerjisi ile kurutma, farklı şekillerde yapılabilir. Güneş altında sererek kurutma yöntemi, güneş enerjili kurutmadaki en temel yöntemdir. Fakat bu yöntemde istenilen ürün kalitesi ve kuruma hızı sağlanamamaktadır. Kurutma işleminden sonra ürünlerin uzun süre muhafaza edilebilmesi, lezzetini ve besin değerini kaybetmemesi, istenilen kuruma süresine sahip olması ve çevreyi kirletmemesi için güneş enerjili kurutma sistemleri tasarlanıp kullanılmaktadır.

Güneş enerjili kurutma sistemleri, pasif ve aktif sistemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Pasif sistemler, doğal sirkülasyonlu ve geleneksel sistemlerden oluşurken, aktif sistemler dış kuvvetler etkisiyle kurutmanın yapıldığı sistemlerden oluşmaktadır. Bu iki grup, üç sınıfa ayrılmaktadır [12]:



Şekil 1. Enerji depolama yöntemleri [6] (Energy storage methods)

- Doğrudan (direkt) tip güneş enerjili kurutucular,
- Dolaylı (endirekt) tip güneş enerjili kurutucular,
- Hibrit (doğrudan ve dolaylı) tip güneş enerjili kurutucular.

Direkt tip kurutucular, güneş ışığını doğrudan kullanırlar. Güneş ışığı, kurutucu içerisindeki saydam kurutma odalarından geçmektedir. Gelen güneş enerjisi direkt olarak ürünle temas ederek ürünün nem kaybetmesini sağlar. Oda içerisindeki sıcaklık artışı ile hava genişler ve hava sirkülasyonu oluşur. Havanın bağıl nemi azalır, nem taşıma kapasitesi artar.

Endirekt tip kurutucu tasarımlarında, odacıklarda ya da raflarda bulunan ürünler, kolektör vasıtasıyla güneş ışığı olmadan hava akımı ile ısıtılır. Ürünler güneş radyasyonuna direkt maruz kalmadığı için radyasyondan kaynaklanabilecek zararların önüne geçilmiş olur. Besinlerde oluşabilecek vitamin kaybı ve renk bozulmalarının da önüne geçmek için uygun bir yöntemdir [1].

Hibrit kurutucularda doğrudan güneş ışığına maruz kalan ürünler, fanın yarattığı hava akımıyla da ısıtılmaktadırlar.

Her malzemenin farklı kuruma karakteristiği vardır. Bu durum doğru kurutma yöntemini ve doğru kurutucu tipini seçmeyi gerektirir. Güneş enerjili kurutma sistemleri, yatırım maliyetinin dışında bir maliyet yaratmadığından sıkça tercih edilmektedir. Güneş enerjili kurutucular hem enerjiden hem de zamandan tasarruf edilmesini sağlarlar. Ancak bu sistemlerde, güneş enerjisinden yalnızca gündüz vakitlerinde yararlanıldığından bir dezavantajı da bulunmaktadır. Bazı malzemeler sürekli kurutma işlemi gerektirdiği için güneş enerjisinin kullanımı süreci kısıtlamaktadır. Bu sebeple güneş enerjisinin depolanması ve depolanan enerjinin güneş ışınının olmadığı zamanlarda kullanılması gerekmektedir [12].

Güneş panellerinin verimini sıcaklık ile düşmektedir. Güneşten gelen ışınım miktarının artması üretilen elektrik enerjisi miktarını artırırken, ışınımın gelen sıcaklık veriminin düşmesine yol açmaktadır. Bu sebeple PV sistemlerde verim düşüşünü engellemek amacıyla, fazla ısıyı sistemden çekmek için FDM'ler kullanılmaktadır.

Ceylan ve ark. [13], panellerin soğutulmasının etkinliğini incelemiştir. Çalışmalarında panelin arka yüzeyinden 0-5 m/s hızlarında hava geçirerek farklı ortam şartları ve güneş ışınım değerlerinde test gerçekleştirmişler, sıcaklık artışının panellerde büyük verim kayıplarına yol açtığını gözlemlemiştir. Çalışma sonucunda, paneller soğutulduğunda arka yüzeydeki sıcaklığın düştüğünü ve panellerin açık devre geriliminde artış olduğunu göstermişlerdir. Kabul ve Yaşar [14], PV panelin arka yüzeyine yerleştirdikleri boruların içinden geçirdikleri su ve hava ile soğutma yaparak panel verimini yükseltmeyi hedeflemiştir. Soğutma işlemi su ile yapıldığında PV/T yüzey sıcaklığı %16 azalırken, hava ile soğutma yapıldığında PV/T panellerin soğutma yapılmayan PV panellere göre yüzey sıcaklığı %8 daha yüksek ölçülmüştür. Kazem [15], yaptığı çalışmada su kullanılan

PV/T sistemlerin verimlilik değerini araştırmıştır. Çalışma sonucunda, PV/T sistemlerden PV sistemlere göre yaklaşık %6 daha fazla çıkış gücü alındığı belirlenmiştir. Ceylan ve ark. [16], spiral şeklinde ısı değiştiricisi kullanarak panellerin arkasında su sirkülasyonu sağlamayı amaçlamışlardır. Çalışmalarında, güneş kolektöründe panellerin soğutulmasında kullandıkları suyu kullanmışlardır. 45°C'de gerçekleştirdikleri deneylerde soğutma yapılan modüllerin veriminin, soğutma yapılmayan modüllere göre %3 daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir.

Preet ve ark. [17], PV panel, su soğutmalı PV/T panel ve FDM kullanılan su soğutmalı PV/T panel tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Üç farklı kütleli debi kullandıkları bu deneylerde kütleli debi değişiminin elektriksel ve termal verim üzerindeki etkilerini incelemişler ve en iyi sonuca en yüksek kütleli debi kullanıldığında ulaşmışlardır. PV modülde en yüksek modül sıcaklığı olan 85°C'ye ulaşmışlardır. PV/T sistemde PV panele göre sıcaklık düşümünü %47 olarak ölçmüşler ve bu oranın FDM eklenen sistemde %53 olduğunu bulmuşlardır. Panellerin elektrik verimlerinin ise su soğutmalı PV/T kolektörde %10,66, FDM kullanılan PV/T panelde ise %12,6 olduğunu gözlemlemiştir. Hosseinzadeh ve ark. [18], tasarladıkları PV/T sistemin enerji ve ekserji analizlerini yapmışlardır. PV/T sisteme nanoakışkan FDM entegre etmişlerdir. Geleneksel PV, nano akışkanlı PV/T ve nano akışkanlı PV/T-FDM olmak üzere üç farklı sistemi test etmişlerdir. FDM kullanılan sistemin gücünün, geleneksel sisteme göre %29,6 arttığını gözlemlemiştir. Nabhan [19], parafin mumunun termal iletkenliğini, farklı kütle konsantrasyonuna sahip parçacıkları ekleyerek artırmıştır. Çalışma sonucunda, sıcaklığın artmasıyla kompozitlerin ısı iletkenliğinin düştüğü, nanopartikül ilavesiyle termal iletkenliğin ve faz değişim sıcaklığının arttığı gözlemlenmiştir.

Cellura ve ark. [20], FDM'nin PV paneller üzerindeki etkilerini incelemiştir. FDM kullanılmayan PV panel verimini %12, PV/FDM panel verimini ise %26 olarak bulmuşlar, sonuç olarak FDM kullanımının panel verimini arttığını ispatlamışlardır. Stritih ve Stropnik [21], FDM kullandıkları çalışmada, fotovoltaiik panellerin verimini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada TRNSYS simülasyon programı ve RT28HC faz değiştiren malzemesi kullanılmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda; %11,4 olan fotovoltaiik sistem verimi, faz değiştiren malzeme kullanımıyla %12,2'ye yükselmiştir. Browne ve ark. [22], Dublin iklim koşullarında PV/T-FDM sistem tasarımı gerçekleştirmişler ve bu tasarımı FDM kullanılmayan bir PV/T sistemiyle kıyaslamışlardır. Gerçekleşen kıyaslama sonucunda; PV/T sisteminde FDM kullanımı sayesinde su sıcaklığının yaklaşık 5,5°C daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Bhardwaj ve ark. [23], çeşitli bitkilerin kurutulmasını sağlamak amacıyla dolaylı tip güneş enerjisi destekli kurutucu tasarımı ortaya koymuşlardır. Geliştirilen tasarımın kurutma kabininde hem gündüz hem de gece

saatlerinde ısı performansını değerlendirilmiştir. Gizli ısı depolanma yönteminin kullanıldığı bu çalışmada parafin barındıran RT-42 tip termal enerji depolama sahasını, hava soğutmalı güneş enerjisi kolektörü ve duyulur ısı depolama ortamı ile donatmışlardır. Çalışmalar esnasında 9 kg kediotu 120 saatte kurutulmuş olup termal enerji depolama ünitesine sahip havalı güneş kolektörünün enerji verimliliğinin %26,1, termal enerji depolama ünitesi bulunmayan havalı güneş kolektörünün enerji verimliliğinin ise %9,8 olduğu görülmüştür. Termal depolama ünitesine sahip olan ve olmayan havalı güneş kolektörlerinin ekserji verimi ise sırasıyla, %0,81 ve %0,14 olarak saptanmıştır. Shalaby ve Bek [24], gerçekleştirmiş oldukları çalışmada faz değiştiren malzeme kullanarak yeni bir dolaylı tip güneş enerjisi destekli kurutucu tasarımı yapmışlar ve bu tasarımın performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarda FDM kullanılan ve kullanılmayan durumlar incelenmiş olup, FDM kullanıldığında kurutma sıcaklığı 1 günde 7 saat boyunca art arda sabit kalmış ve kurutma havasının stabil kaldığı görülmüştür. Bu durumla, uçucu yağ özelliği gösteren ve tıbbi amaçla kullanılan bitkilerin kurutulmasının uygun olduğu kanısına varılmıştır. Ayrıca sistemde FDM kullanılmadığında, kurutma havası sıcaklığı 3,5-6,5°C arasında artış göstermiştir.

El Khadraoui ve ark. [25], gerçekleştirdikleri deneysel çalışma ile, faz değiştiren malzeme kullanarak tasarladıkları havalı tip güneş kolektörünün güneş almadığı zamanların verime etkisini incelemişlerdir. Çalışmada tasarlanan güneş kolektörü güneş kurutucusuna entegre edilerek FDM kullanılan ve kullanılmayan durumların sistem performansına etkileri incelenmiştir. Sistemde FDM kullanıldığında güneş kolektörünün günlük enerji verimi %33,9, ekserji verimi ise %8,5 olarak hesaplanmıştır. FDM kullanılan durumda ise, gece saatleri süresince kurutma odası sıcaklığının ortam sıcaklığının 4-16°C üzerinde olduğunu, kurutma odasının bağıl neminin ise ortam bağıl nem seviyesinden %17 daha az olduğunu gözlemlemişlerdir. Le ve ark. [26], çeşitli ürünlerin standart nem koşullarına ve kurutma işlemi için farklı zaman dilimlerine ihtiyaç duyduğunu göstermeyi amaçlayan çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirdikleri bu çalışmalarda verimli bir güneş kurutucusu tasarımında; güneş ışınımı, hava sıcaklığı, kuruyan havanın kütle akış hızı, bağıl nem, kurutulacak ürünün çeşidi ve kütlesi gibi değişkenlerin dikkate alınması gerektiğine dikkat çekmişlerdir. Ayrıca, duyulur ısı malzemeleri kullanıldığında güneş enerjili kurutucuların gece saatlerinde de çalışmasının mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Essalhi ve ark. [27], dolaylı tip güneş kurutucusu ve geleneksel olarak doğrudan güneş ışınımıyla üzüm kurutulmasının deneysel ve sayısal analizi üzerinden kıyaslamasını gerçekleştirdikleri bir çalışma ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar gerçekleştirdikleri incelemeler sonucunda, üzümün yaş bazda %79,8 başlangıç nem içeriğinden %20,2 son nem içeriğine düşürülmesi için dolaylı tip kurutucuda 120 saat, geleneksel kurutmada ise 201 saat süreye ihtiyaç

duyulduğunu belirlemişlerdir. Sonuç olarak, dolaylı tip kurutucuda kullanılan depolama sistemi sayesinde geleneksel yöntemle göre kurutma süresinin azaldığı vurgulanmıştır.

Chaatouf ve ark. [28], sistemin verimliliğini ve dinamik davranışlarını geliştirmek amacıyla, FDM ile doldurulan bakır borular şeklinde ısı depolama sistemine bütünleşmiş endirekt tip bir güneş kurutucusu üzerine çalışmışlardır. İncelenen tasarımda, FDM boruları güneş ışınımının olduğu saatlerde termal enerji depolayarak, güneş ışınımının olmadığı zamanlarda depolanan bu enerjiyi kullanmak üzere serbest bırakma prensibine dayalı olarak çalışmaktadır. Depolanan ve sonradan kullanılan enerji miktarı, FDM'nin kimyasal özelliklerine bağlıdır. Bu çalışmada, güneş enerjili kurutucunun verimliliğinin FDM kullanılmasıyla gece vakitlerinde %3 arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Jain ve Tewari [29], termal enerji depolamasına sahip yeni bir güneş kurutucusu tasarımı ortaya koymuşlardır. Tasarımda, kurutma sistemi FDM ile güneşlenmenin olduğu vakitlerde termal enerjiyi depolarken, güneşin olmadığı vakitlerde depolanan duyulur ısı serbest bırakılmaktadır. FDM kullanımı etkisiyle, ilerleyen 5-6 saatlik zaman dilimi süresince sistem etkin bir şekilde çalışmaktadır. Çalışmada sonuç olarak, ortaya konulan tasarım sayesinde depolanan enerjiyle, kurutma sıcaklığı 40-45°C dolaylarında tutulmuş ve kurutucunun ısı verimi %28,2 olarak hesaplanmıştır.

Günerhan ve Hepbaşlı [30], çalışmalarında ısı depolama malzemesi olarak kullandıkları bazalt taşının birçok yönünü araştırmışlar ve duyulur ısı depolama sistemine ait teorik hesaplamalar yapmışlardır. "Harry Thomasson" yönteminin kullanıldığı çalışmada, bazalt taşının diğer ısı depolama malzemeleri ile karşılaştırması yapılmış ve sonuç olarak bu malzemenin ısı depolama amacıyla kullanılabilir olduğu belirtilmiştir. Alay ve ark. [31], mikro-kapsüllenmiş FDM'ler (MikroFDM'ler), üzerine çalışmalarda bulunmuşlardır. FDM'lerin belirli sıcaklık aralıklarında fazlarını değiştirdiğine, mikro FDM'lerin faz değiştiren maddelerin ince ve esnek bir polimer kabuk içerisinde kapatılması ile üretildiğine, mikro FDM'lerde faz değiştiren malzemelerin büyük yüzey alanlarından dolayı ısı transfer oranlarının yüksek olduğuna ve küçük boyutta olmalarından dolayı da uygulamaların kolay yapıldığına dikkat çekilen çalışmada, mikro FDM'lerde kabuk maddesi olarak etil akrilat polimeri ve çekirdek maddesi olarak da n-hekzadekan kullanıldığı belirtilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen mikro FDMler; Fourier dönüşümlü kızılötesi (FT-IR) spektroskopisi ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak karakterize edilmiş ve ısı özellikleri diferansiyel taramalı kalorimetre yöntemi ile tespit edilmiştir. Utlu ve ark. [32], Güneş Evi'nin güneş kolektörleri ile ısıtılmasını ve ısı enerji depolamanın kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Ayrıca çalışmada, güneş enerjisi destekli ve toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinin yeşil binalarda ısıtma amaçlı kullanımı esnasında, ısı enerji saklama sistemlerinin gerekliliğini de incelemişlerdir. Bu kapsamda,

çalışmalarında ısı enerjisi saklamada kullanılan farklı yöntemler araştırılmış ve mukayeseleri gerçekleştirilmiştir. Güneş panelleri, toprak kaynaklı ısı pompası ve faz değiştiren madde olarak da parafin kullanılan gizli ısı deposu ile çalışan bir ısıtma sisteminin termodinamik analizi yapılan çalışmada, FDM'nin gizli ısısından yararlanılarak oluşturulan gizli ısı depolarının verimliliği incelenmiştir. Ayrıca, farklı toprak sıcaklıkları ve güneş ışınımı değişimine göre enerji depolama miktarının değişimi de gözlemlenmiştir.

Lefebvre ve Tezel [33], adsorpsiyon yoluyla termal enerji depolamaya odaklanarak, araştırılmakta ve geliştirilmekte olan çok sayıda enerji depolama teknolojisine ilişkin derleme çalışmasında bulunmuşlardır. Çalışmada, adsorpsiyon süreçlerinin kullanıldığı termal enerji depolama yönteminin mevcut durumda ekonomik olmadığı ancak malzeme biliminin sürekli gelişmesi ve sağlanan sistem optimizasyonları ile bu teknolojinin yakın gelecekte rekabetçi olma potansiyeline dikkat çekilmiştir. Esen ve Ayhan [34], güneş enerjisi destekli silindirik enerji depolama tankının performansını teorik olarak incelemişlerdir. Çalışmada, faz değişimli enerji depolama ünitesinin geçici davranışını açıklayan entalpi temelli bir model kullanılmış olup, tankta enerji faz değiştiren malzemenin gizli ısısı olarak depolanmıştır. Tanktaki FDM'nin silindirlere içinde paketlenmesi ve ısı transfer sıvısının bu silindirlere paralel olarak aktığı belirtilmiştir. Teorik bağlamda ortaya konulan denklem seti, Gauss-Seidel yineleme süreci aracılığıyla çözümlenmiştir. Isı pompaları ile evsel ısıtmada ısı depolama malzemesi olarak kullanılacak farklı FDM'lerin ısı depolama kapasiteleri belirlenerek karşılaştırılmıştır. Çalışmada tankın termal performansını optimize etmek için; FDM'nin, silindir yarıçapının, kütle akış hızının ve ısı transfer sıvısının giriş sıcaklığının dikkatli bir şekilde seçilmesi gerektiği ortaya konulmuştur.

Esen ve ark. [35], çalışmalarında enerji depolama tanklarının performansını teorik olarak optimize etmişlerdir. Çalışma esnasında, faz değişim ünitesinin günlük geçici davranışını tanımlayan iki farklı model kullanılmış olup çeşitli FDM'lerin, silindir yarıçaplarının, boru yarıçaplarının, tanktaki toplam FDM hacminin, sıvının kütleli akış hızlarının ve ısı transfer akışkanının giriş sıcaklıklarının depolama süresi üzerindeki etkilerini değerlendirmek için bir dizi sayısal test gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışmada, depolamanın bu parametrelere ve FDM'lere bağlı optimum geometrik tasarımı da araştırılmıştır. Esen [36], güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemine bağlı silindirik faz değişimli depolama tankını deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Tanktaki faz değiştiren malzeme silindirik boruların içerisinde ve ısı transfer akışkanı bu borulara paralel olarak akmaktadır. Modelin ısı transferi süreci, entalpi tabanlı sonlu farklar yöntemiyle sayısal olarak çözülmüş ve deneysel verilerle de doğrulanmıştır. Deneyler, hem tank içindeki suyun ortalama sıcaklığını hem de tankın giriş ve çıkış su sıcaklığını ölçmek için

1992-1993 ve 1993-1994 ısıtma sezonlarında kasım ayından mayıs ayına kadar gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak elde edilen giriş suyu sıcaklıkları, simüle edilen modelin de giriş suyu sıcaklığı olarak alınmış ve böylece tank içindeki teorik sıcaklık ve depolanan ısı enerjisi dağılımları belirlenmiştir.

Literatür araştırması sonucunda mevcut tasarımlar ile bu tasarımların avantajlı ve eksik tarafları irdelenerek ekonomik, ekolojik, esnek ve sürdürülebilir bir yapı oluşturulabilmesi için yenilikçi bir eko tasarım kurutma sistemi yapılmıştır. Yapılan tasarımın amaçları:

- Yenilenebilir enerji sistemlerinin daha aktif olarak kullanılması ve fosil yakıtlara olan bağımlılıktan kurtulabilme,
- Güneş enerjisinin devamlılığının olmamasından dolayı enerji depolama sisteminin kullanımı ile gün batımından sonra da kurutma işleminin devamlılığının sağlanması,
- Sera etkisinin ve karbon ayak izinin azaltılması,
- Kurutma sisteminde enerji verimliliğinin artırılması,
- Dış hava sıcaklığının düşük olduğu durumlarda ısı geri kazanım sisteminin kullanımı ile atık ısıdan yararlanılması,
- Kurutulacak ürün kalitesinin kontrolü ile ürün fire miktarının azaltılması ve kurutulmuş ürün kalitesinin yükseltilebilmesi,
- Kurutma sisteminde tek tip ürün yerine farklı ürün kurutulmasına olanak sağlanması.

olarak sıralanmaktadır.

Eko tasarım kurutma sisteminin hedefleri şematik olarak Şekil 2'de özetlenmiştir. Yeni nesil eko kurutucu tasarımında PV/T paneller ile elektrik üretilmesi, üretilen enerjinin akülerde depolanması, paneller ile kurutma havasının ısıtılması ve panellerin soğutulması verimlerinin artırılması sağlanacaktır. Güneş ışınımının yüksek olduğu periyotta, ısı depolama (duyulur ve/veya gizli ısı depolama) sistemi kullanılarak kurutma işleminin gün boyunca devam etmesi sağlanacaktır. PV/T kolektörler ile üretilen ve depolanan elektrik enerjisi, güneş enerjisinin yetersiz olduğu zaman dilimlerinde infrared lambaların, hava sirkülasyonunu sağlayacak fanların ve diğer sistem bileşenlerinin beslemesi için kullanılacaktır. Kurutma sisteminden çıkan sıcak ve nemli hava da dış ortam havasının sıcaklığının düşük olduğu zamanlarda ısı geri kazanım cihazından geçirilerek bu ısı, giriş havasına aktarılacak ve kurutma havasının ön ısıtılmasında kullanılacaktır. Bu sayede atık ısı geri kazanımı sağlanarak enerji verimliliği maksimum düzeye çıkarılacaktır.

Yapılan yeni nesil eko kurutucu tasarımında farklı modların bulunması ve sistemin bir kontrol ünitesi ile kontrol edilebilme kabiliyetinin olması da enerji verimliliği açısından olumlu etkiler yaratacaktır. Sistem, dış ortam koşulları ve güneşlenme durumuna göre iki farklı moda ek olarak bir de karma mod sistemi ile kurutma işlemini gerçekleştirecektir.



Şekil 2. Eko tasarım kurutma sisteminin hedefleri (Objectives of eco-design drying system)

Sistemin farklı modlarda çalıştırılması ile güneş enerjisinden en verimli şekilde yararlanılacak, güneş enerjisinin kullanılmayacağı periyotta birincil ve ikincil enerji kaynakların kullanıldığı göz önüne alındığında hem enerji tasarrufu sağlanacak hem de CO<sub>2</sub> salımı azaltılacaktır.

### 3. SİSTEMİN ENERJİ VE KURUTMA PERFORMANS ANALİZİ (ENERGY AND DRYING PERFORMANCE ANALYSIS OF THE SYSTEM)

#### 3.1. PV/T Panel Enerji ve Verim Analizi (Energy and Efficiency Analysis of PV/T Panel)

Enerji, bir sistemin mevcut olan durumunu değiştirmek amacıyla yapılan iş yapma kapasitesidir. Sistemlerin enerji analizini yapmak amacıyla da termodinamiğin birinci yasasından faydalanılmaktadır. PV sistemlerde, güneş ışınımının yutucu yüzeylere temasıyla elektrik enerjisi elde edilmektedir. PV/T kolektörlerde elektriksel verim termal verime göre çok daha azdır [37].

Isıl sistemlerin verimi, sistemden elde edilen net işin, sisteme giren işe oranıyla hesaplanmaktadır. PV/T kolektörler hibrit sistemler olduklarından hem ısıl hem de elektrik enerjisi çıktılarını sağlamaktadır. PV/T kolektörlerin toplam verimi, ısıl verim ve elektriksel verimin toplamı olan Eşitlik (1) ile hesaplanabilmektedir [38]:

$$\eta_{sistem} = \eta_{th} + \eta_e \quad (1)$$

PV sistemlerin elektriksel verimi Eşitlik (2) ile hesaplanmaktadır [38]:

$$\eta_e = \eta_r [1 - \beta(T_{panel} - T_r)] \quad (2)$$

Isıl verim, PV/T kolektörlerden elde edilen ısı enerjisinin, sisteme gelen güneş radyasyonuna oranı olup Eşitlik (3)'ten elde edilmektedir [39]:

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{G_t A_c} \quad (3)$$

PV/T kolektöre güneş radyasyonu geldiğinde, soğurulan radyasyonun bir bölümü iş akışkanına aktarılmakta ve faydalı enerjiye dönüşmektedir. Ancak bütün termal sistemlerdeki gibi, sistemin çevreyle olan ısı transferi süreci neticesinde enerji kayıpları da meydana gelmektedir. Kararlı durum şartlarında iş akışkanınca soğurulan ısı, güneş kolektörünce soğurulan enerji miktarı ile yüzeyden çevreye olan ısı kayıpları arasındaki farka eşittir. Kolektörden çevreye doğru olan ısı kayıpları iletim, taşınım ve ışınım şeklinde oluşmaktadır. Bu nedenle kararlı durum şartlarında bir kolektörden elde edilen enerji denklemi ile hesaplanabilmektedir [40]:

$$\dot{Q}_u = A_c [G_t (\tau\alpha) - U_L (T_p - T_a)] = \dot{m} c_p [T_0 - T_i] \quad (4)$$

Isı kazanç faktörü kullanımı ile ortalama plaka sıcaklığının yerini akışkanın giriş sıcaklığı almaktadır. Akışkanın giriş sıcaklığı tüm ısıtma sistemine, hava talebine ve kullanılacak olan etkin alanın ısıtma yüküne bağlı iken kazanç faktörü güneş kolektörünün özelliklerine, akışkanın çeşidine ve akışkanın debisine bağlı olup Eşitlik (5) ile hesabı gerçekleştirilmektedir [40]:

$$F_R = \dot{m} c_p A_c U_L \left[ 1 - \exp\left(-\frac{U_L F' A_c}{\dot{m} c_p}\right) \right] \quad (5)$$

Eşitlik (3) ve Eşitlik (4) ile gösterilmiş olan ısıl verim ve kolektörden elde edilen enerji ifadeleri, ısı kazanç faktörü hesaba katılarak yeniden düzenlendiğinde eşitlikler:



$$\eta_{th} = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \left[ \frac{T_i - T_a}{G_t} \right] \quad (6)$$

ve

$$Q_u = A_c F_R [G_t(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)] \quad (7)$$

halini almaktadır [40].

Eşitlik (6)'da görüldüğü üzere iş akışkanının giriş sıcaklığı ve ortam sıcaklığı arasındaki fark arttıkça sistemin ısı kayıpları da artmaktadır.

### 3.2. Isıl Depolama Sistemi Enerji Analizi (Energy Analysis of Thermal Storage System)

Faz değiştiren malzemelerin kullanımı ile güneşten gelen enerji duyulur ve gizli ısı olarak depolanmaktadır [41].

$$h_s = \int_T^{T_m} c_s dT \quad T \leq T_m, \text{ Katı faz} \quad (8)$$

$$h_L = \int_{T_m}^T c_L dT \quad T \geq T_m, \text{ Sıvı faz} \quad (9)$$

Faz değiştiren malzeme tarafından sisteme aktarılan toplam ısı enerjisi Eşitlik (10)'daki gibi belirlenir [41]:

$$\dot{Q}_{toplam} = \dot{Q}_S + \dot{Q}_{LT} + \dot{Q}_L \quad (10)$$

### 3.3. Kurutma Parametrelerinin Analizi (Analysis of Drying Parameters)

Kuru bazda ürünlerin başlangıç nem içeriği Eşitlik (11) kullanılarak hesaplanabilir [42]:

$$MC_{db} = \frac{M_i - M_d}{M_d} \quad (11)$$

Kurutma işlemi esnasında nem oranı Eşitlik (12) kullanılarak hesaplanabilir [42]:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} \quad (12)$$

Özgül nem çekme oranı (SMER), kurutulan ürün içeriğinden buharlaşan nemin kurutucuya giren enerjiye oranı olup Eşitlik (13) ile hesaplanır [43]:

$$SMER = \frac{\text{Alınan Nem}}{\text{Harcanan Enerji}} \quad (13)$$

## 4. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Ürünlerin kurutulması birçok parametreye bağlıdır. Bu parametrelerin kontrolü sayesinde ürünlerin kurutma işlemi daha sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilerek ürün kalitesi yükseltilmekte ve fire miktarı düşürülmektedir. Kurutma işlemi mekanizması gereği, kurutulacak ürün

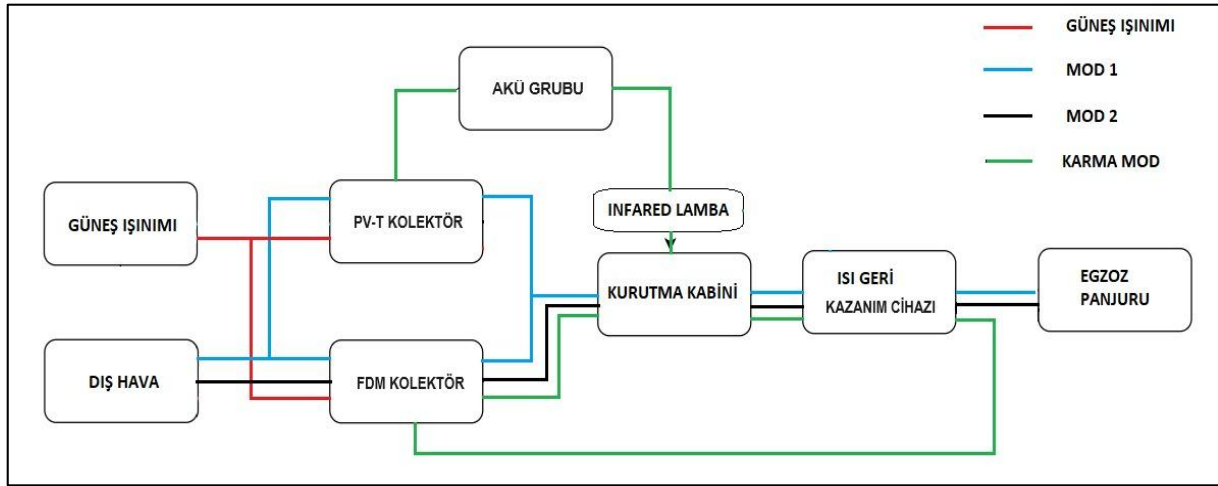
içerisindeki suyun üründen uzaklaştırılarak ürün nem miktarını belli bir düzeyde tutmak gerekmektedir. Bu işlemde kurutulacak ürün miktarları göz önüne alındığında yüksek enerji maliyetlerini ortaya çıkabilmektedir. Konvansiyonel enerji kaynaklarının rezerv miktarının azalması ve enerji maliyetlerinin artması sonucunda geleneksel kurutuma sistemleri sürdürülebilir gözükmemektedir. Ayrıca geleneksel sistemlerde konvansiyonel enerji kaynaklarının kullanımı sonucunda yüksek oranda CO<sub>2</sub> salımı meydana gelmektedir.

Mevcut sorunların ışığında bu çalışmada, güneş enerjisinin kullanımı ile konvansiyonel enerji kaynaklarının tüketiminin önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Fakat güneş enerjisinin kullanımı sınırlı ve kesintili olduğu için gün boyu ürünlerin kurutulması mümkün olmamaktadır. Yeni nesil eko tasarım kurutma sistemi, enerji maliyetlerinin ve birincil enerji kaynaklarına olan bağımlılığın azaltılması, CO<sub>2</sub> salımının önüne geçilmesi ve güneş enerjisinin kesintili olmasından dolayı farklı modlarda çalışarak gün boyu sürdürülebilir kurutma işleminin gerçekleştirilmesine katkı sağlayacak bir yapı ortaya koyacaktır.

Yapılan eko kurutma sistemi tasarımı ile endirekt kurutucuda ürünün güneş ışığı görmeden hava akımıyla kurutulması planlanmış, konvektif kurutma sistemine ilave olarak infrared lambalar kullanılarak kombine bir kurutma sistemi oluşturulmuştur. Kurutmada kullanılacak hava, havalı kolektör yüzeyinden geçirilerek ısıtılacak, bu sayede oluşan ısı transferi ile PV/T kolektörde soğuma yaşanarak elektriksel verimlilikte de artış oluşacaktır. Güneş radyasyonu ve çevre sıcaklığı fazla olduğu zamanlarda çıkış sıcaklığı etkin sonuçlar verebilmekte ancak sıcaklığın ve radyasyonun azaldığı zamanlarda kurutma verimi düşmektedir. Yaz aylarında kurutma verimi yüksek olmasına karşın PV/T havalı güneş kolektörlerin verimi oldukça düşmektedir. Bu doğrultuda, hava akımı sayesinde soğutulacak olan PV/T kolektörlerin verimlerinin de artırılması amaçlanmaktadır.

Gerçekleştirilen tasarımda güneşlenmenin fazla olduğu periyotlarda, PV/T panellerde üretilen elektrik enerjisinin akülerde depolanması planlanmıştır. Bulutlu ve güneş ışınım seviyesinin azaldığı saatlerde depolanan elektrik enerjisi, elektrikli ısıtıcı ile hem kurutma işleminde hem de fan gibi cihazların beslenmesinde kullanılacaktır. Güneş ışınım değerlerinin kurutma enerjisinin üstünde olduğu zamanlarda, fazla enerji duyulur ısı depolama yoluyla veya faz değiştiren malzemeler ile depolanacaktır. Işınım miktarının azaldığı periyotlarda veya gün batımında kurutma işlemini devam ettirmek için depolanan mevcut enerji kurutuma sisteminde kullanılacaktır.

Eko tasarım kurutma sisteminde yoğunlaştırılmış havalı kolektör kullanılan endirekt bir ısı depolamalı ve ısı geri kazanımlı kurutucu tasarlanmıştır. Şekil 3'te yeni nesil eko tasarım kurutucu sisteminin akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 3. Yeni nesil eko kurutma sistemi akış diyagramı (Flow diagram of new generation eco drying system)

Güneş ışınımının yoğunlaşmasıyla birlikte panel sıcaklığı da artacaktır. Elektriksel verimi artırmak ve PV modüllerdeki fazla ısıdan kazanç sağlamak amacıyla hava veya su soğutma sistemi kullanılabilir. Yeni nesil eko tasarım kurutma sisteminde PV/T panelin soğutulması için hava akışı kullanılmıştır. Dış hava PV/T panel arkasından geçirilerek, panellerin soğutulması sağlanmış, aynı zamanda panel ısısı hava üzerine aktarılarak havanın ısınması sağlanmıştır. Isınan hava hız kontrollü bir fan aracılığıyla kurutma kabineye aktarılacaktır. Havanın yönlendirilmesi ve sistem içerisinde dolaşımı için modlara göre damperler ile kontrol edilecektir. PV/T paneller aracılığı ile akülerde depolanan elektrik enerjisi ile hız kontrollü fan, damperler, kontrol ünitesi ve merkezi bilgisayar sisteminin çalışması için gerekli olan enerji sağlanmış olacaktır.

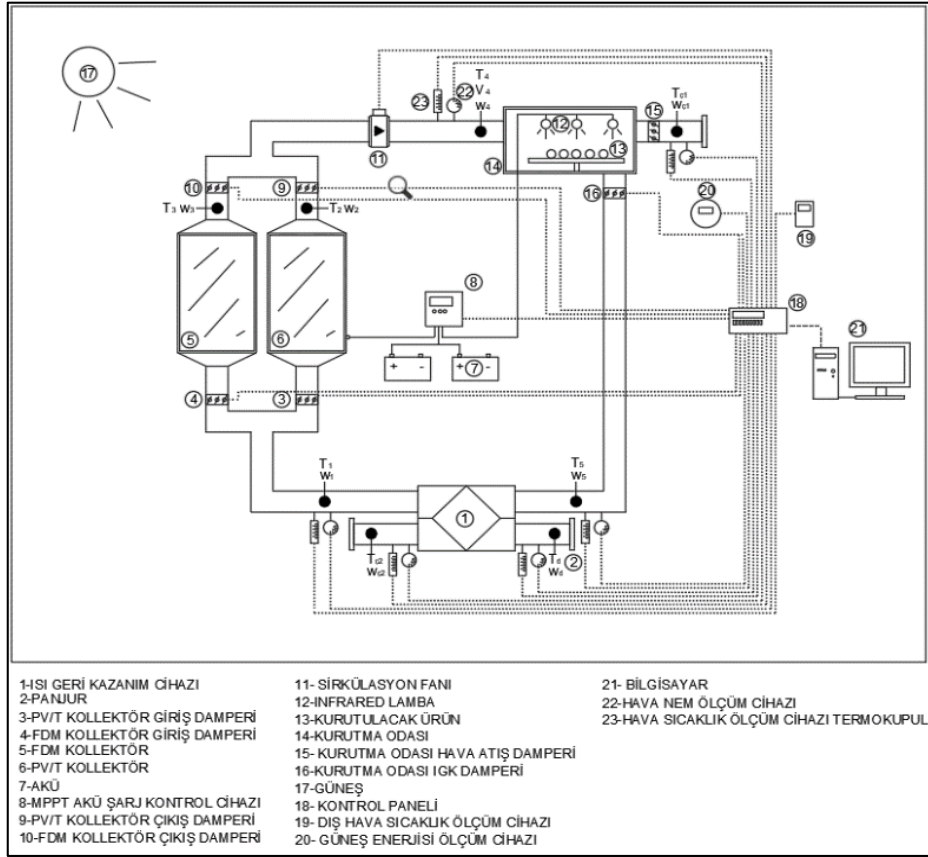
Sistemde sıcaklık ölçümleri için termometreler, hava debisi ölçümü için anemometre kullanılacaktır. Enerji analizlerinin yapılması için solar metre ile güneş ışınım ölçümleri yapılacaktır. Kurutma kabindeki nem miktarı bir nem sensörü aracılığıyla belirlenecektir. Ürünlerin kuruma periyodunu kontrol etmek için tartı konularak

kurutulan ürünlerin belirli periyotlarda ağırlıkları ölçülecektir. Sistem kontrolü için mikro işlemci kullanılan otomasyon sistemi entegre edilmesi ile güneş ışınımının durumu ve dış koşullara göre sistemin kendi kendini kontrol etmesi planlanmıştır. Otomasyon sistemi sayesinde deneylerde kullanılan sensörlerin değerlerinin görüntülenmesi ve kayıtların tutulması planlanmaktadır. Ayrıca tasarımın bir parçası olarak, veri işleme kayıt ve depolama için de bir bilgisayar kullanılacaktır.

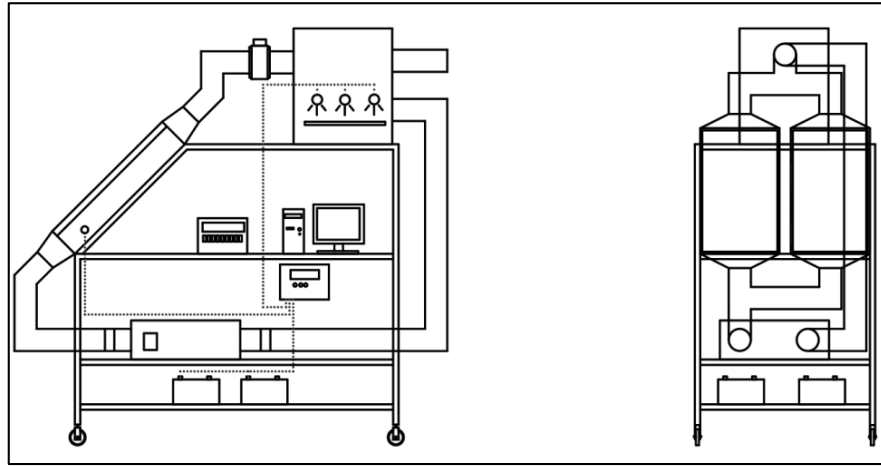
Kullanılacak otomasyon sistemi, sistemde yer alan fanın ihtiyaç duyacağı enerjiyi güneş ışınımının yeterli olduğu zamanlarda fotovoltaik modüllerden, güneş ışınımının yetersiz olduğu zamanlarda ise bataryadan sağlayacaktır. Havalı kolektör içerisinde enerji depolama malzemesi olarak ise, parafin mumu kullanılacaktır. Şeffaf bir yapıya sahip olan parafin mumu, içerisinden güneş

ışınımını geçirebilmektedir. Bu şeffaflık sayesinde paneldeki alüminyum plaka güneş ışınımı ile ısınarak parafin mumunu faz değiştirme sıcaklığına getirecek, bu sayede hem duyulur hem de gizli ısı depolaması yapılabilecektir.

Şekil 4 ve Şekil 5'te kurutma sisteminin genel görünüm şeması verilmiştir. Bu tasarımda; 11 numara ile gösterilen sirkülasyon fanı, sistemde kurutma işlemine kullanılıp kurutma işlemine üründen alınan nem taşıyan havanın hareketini sağlamaktadır. 2 numaralı ekipman hava atış panjurudur. 3 ve 4 numaralı ekipmanlar ise hava hareketinin kontrolünü sağlayan damperler olup sistemde sirküle ettirilen havanın yönlendirilmesini sağlayacaklardır. 6 numaralı ekipman PV/T kolektördür ve güneş enerjisini elektrik ve ısı enerjisine dönüştürmektedir. Dönüştürülen elektrik enerjisi 8 numaralı maksimum güç noktası takibi (MPPT) cihazı ile 7 numaralı akülerin şarj verimliliğini sağlayarak, şarj-deşarj esnasında aküleri korumakta ve ömürlerinin uzun olmasına katkı sağlamaktadır. Hava, kanallar vasıtası ile iletilmekte olup 19 numaralı sıcaklık ölçüm cihazı, 20 numaralı solar metre, 22 numaralı anemometre ve 14 numaralı higrometreden gelen bilgiler ve damperlerin açma-kapanma bilgileri 18 numaralı kontrol panelinde işlenmekte ve 21 numaralı bilgisayarda enerji analizlerinin yapılabilmesi için depolanmaktadır. Isıl enerjinin depolanması ve sistemde dolaşan kurutma havasının ısıtılması için 5 numaralı havalı tip FDM kolektör ve gece boyu kullanılacak kurutma enerjisinin depolanması sağlanarak kurutma enerjisinin devamlılığı sağlanmıştır. 13 numaralı kurutulan ürün 14 numaralı kurutma odası içerisinde görülmektedir. Akülerde depolanan elektrik enerjisini kullanarak 12 numaralı infrared ısıtıcılar, kurutma işlemine destek olacaktır. Son olarak ise dış hava sıcaklığının kurutma sıcaklığından düşük olduğu durumlarda enerjinin verimli kullanılması için 1 numaralı ısı geri kazanım cihazı kullanılarak sistem tasarımı tamamlanmıştır.



Şekil 4. Yeni nesil eko tasarım kurutma sistem tasarım şeması (New generation eco design drying system design scheme)

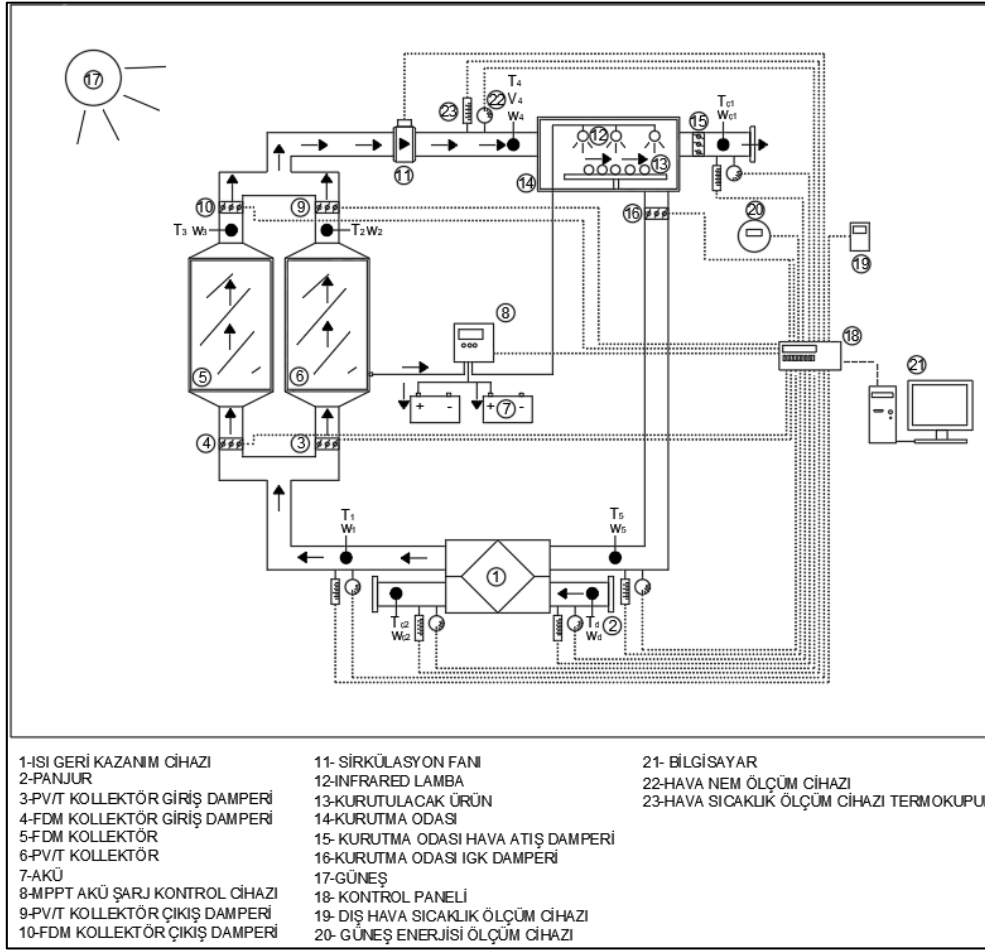


Şekil 5. Yeni nesil eko tasarım kurutma sistem tasarımı (New generation eco design drying system design)

#### 4.1. Çalışma Modu-1 (Operation Mode-1)

Çalışma modu-1, güneş enerjisinin kurutma için yeterli olduğu periyotlarda çalışacaktır. 11 numaralı fan yardımı ile 3-4-9-10 numaralı hava damperleri açılarak kanallar vasıtası ile hava, 5 numaralı PV/T kolektör ve 6 numaralı FDM kolektörden geçirilecektir. Hava oklarla gösterilen güzergahı takip ederek (Şekil 6) kurutma odasına ulaşacak, bu sayede ürünün kurutma işlemi gerçekleştirilmiş olacaktır. Aynı zamanda da PV/T kolektör sayesinde akülerde elektrik enerjisi ve FDM

kolektörde ısı enerjisi depolanması sağlanacaktır. Bu modda kurutma işlemi esnasında yalnızca güneş enerjisinden faydalanılması planlanmıştır. Motorlu hava damperlerinin açılıp kapatılması, kontrol paneline bağlanan bilgisayar yardımıyla gerçekleştirilecektir. Kurutma süresince hava sıcaklığı, güneş ışınımı şiddeti, kurutma odası giriş ve çıkış sıcaklıkları, kurutma odası hava giriş hızı ve kurutma odasında havanın bağıl nemi de bilgisayar tarafından kayıt altına alınacaktır. Şekil 6'da kurutma sistemi için tasarlanan mod-1 şematize edilmiştir.

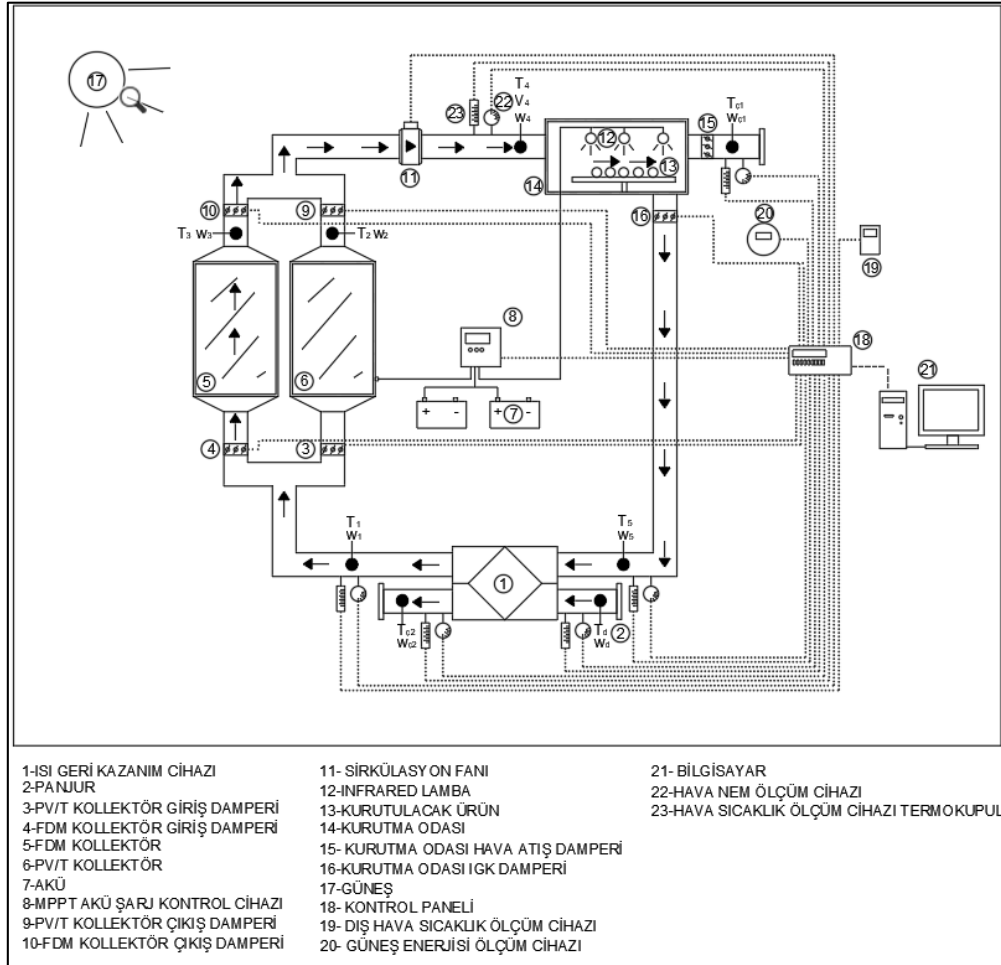


Şekil 6. Çalışma modu-1: Güneş enerjisinin kurutma için yeterli olduğu periyotta kurutma sistemi (Operating mode-1: Drying system during the period when solar energy is sufficient for drying)

#### 4.2. Çalışma Modu-2 (Operation Mode-2)

Güneş ışınımının yeterli olmadığı anlarda, özellikle gün batımı saatlerinde, havanın güneş enerjisi ile ısıtılması sağlanamamaktadır. Çalışma modu-2’de kurutma sisteminde kullanılacak olan havanın ısıtılmasında FDM entegre kolektör sayesinde depolanan duyulur ve gizli ısı enerjisinin kullanılması amaçlanmaktadır. 1 numaralı fan yardımı ile 4-10 numaralı hava damperleri açılacak, 3-9 numaralı hava damperleri kapatılarak hava, kanallar vasıtası ile 5 numaralı FDM kolektörden geçirilecek ve oklarla gösterilen şekilde akarak, havanın kurutma odasına üflenmesi sağlanacaktır. Bu sayede ürünün kurutma işlemi gerçekleştirilmiş olacaktır. Havanın PV/T kolektör üzerinden geçirilmesi soğumasına neden olacağı için akış kapatılarak havanın geçmesinin önüne geçilecektir. Bu modda kurutma odasında ürünlerin kurutulması işlemi esnasında yalnızca faz değiştiren malzemede depolanan duyulur ve gizli ısı enerjisinden faydalanılması planlanmıştır. Kurutma işleminde kullanılan havanın ısıtılması için yüksek enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu enerjinin egzoz havası ile direkt dışarı atılmaması için 1 numaralı ısı geri kazanım cihazı kullanılmıştır. Bu sayede sıcaklığı yüksek olan kurutma havasının enerjisi dış ortamdan alınan havaya aktarılarak güneşten elde edilen enerjinin maksimum verimlilikte kullanılması amaçlanmıştır. Isı geri kazanım sisteminin kullanımı ile enerji ekonomisi ve enerji verimliliği artırılmıştır. Mod-1 den mod-2’ye geçişte motorlu hava damperlerinin açılıp kapatılması kontrol paneline bağlanan bilgisayar ile sağlanacaktır. Kurutma süresince hava sıcaklığı, güneş ışınımı şiddeti, kurutma odası giriş ve çıkış sıcaklıkları, kurutma odası hava giriş hızı, kurutma odası bağıl nemi ve FDM kolektör çıkışındaki sıcaklık da bilgisayar tarafından kayıt altına alınacaktır. Kaydedilen veriler sayesinde enerji analizlerinin yapılması sağlanacaktır. Mod-2’de kurutma işlemi sürecinde yalnızca depolanan enerjiden faydalanılmaktadır. Şekil 7’de mod-2 için tasarlanan kurutma sistemi görülmektedir.

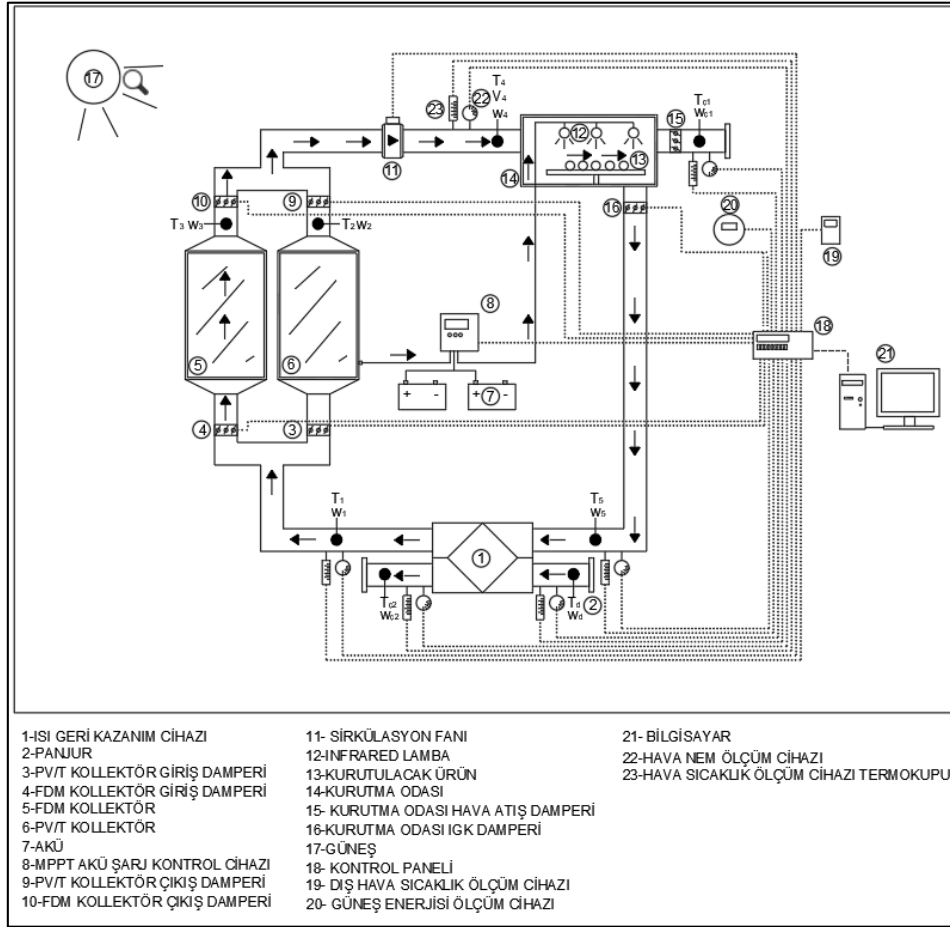


Şekil 7. Çalışma modu-2: Güneş enerjisinin yeterli olmadığı periyotta kurutma sistemi (Operating mode-2: Drying system during the period when solar energy is not sufficient)

#### 4.2. Karma Çalışma Modu (Mixed Operation Mode)

Karma mod, güneş ışınımının yetersiz olduğu periyotta hem faz değiştiren malzemede depolanan ısı enerjisinin hem de akülerde depolanan elektrik enerjisinin birlikte kullanımı sayesinde kurutma işleminin sağlandığı periyottur. Karma modda 3-9 numaralı damperler kapatılmakta, 4-10 numaralı damperler açılarak 11 numaralı sirkülasyon fanı da kullanılarak hava kurutma odasına yönlendirilmektedir. Fan kontrolü ile de hava hızı kontrol edilecektir. 7 numaralı akülerde depolanan elektrik enerjisi ile 12 numaralı infrared lambaların kullanımı sayesinde kurutma işlemi devam ettirilecektir. Karma modun kullanılması sırasında kurutma işlemi, depolanan enerjiler kullanılarak sağlanacağı için fosil yakıtlara olan bağımlılık azaltılmış ve çevreye olan CO<sub>2</sub> salımı azaltılacaktır. Kurutma havası, sıcak ve üründen alınan nem nedeniyle nemli bir havadır. Mevcut sisteme ilave olarak 1 numaralı ısı geri kazanım cihazı kullanımı ile kurutma sisteminde hava ile atılan enerjinin verimli

kullanımının sağlanmasına olanak sağlanacak ve güneş enerjili sistemlerin dezavantajı olan kurutma periyodunun ise depolanan elektrik enerjisi, ısı enerjisi ve ısı geri kazanım sistemi sayesinde devamlığı sağlanmış olacaktır. Bu sayede dışarı atılan sıcak ve nemli kurutma havası, ısı geri kazanım cihazından geçirilerek %35-40 enerji tasarrufu sağlanması amaçlanmıştır. Karma mod ile kurutma işlemi süresinde dış hava sıcaklığı, kurutma odası giriş ve çıkış sıcaklıkları, kurutma odası hava giriş hızı, kurutma odası bağıl nemi, FDM kolektör çıkış sıcaklığı ve FDM depo içerisindeki sıcaklık da bilgisayar tarafından kayıt altına alınacaktır. Karma modda, mod-1 ve mod-2'de olduğu gibi kaydedilen veriler sayesinde enerji analizlerinin yapılması sağlanacaktır. Şekil 8'de kurutma sistemi için tasarlanan karma çalışma modu görülmektedir.



Şekil 8. Karma çalışma modu: Güneş enerjisinin olmadığı periyotta ısı enerjisi ve infrared ısıtıcı kullanımı (Mixed operation mode: Use of thermal energy and infrared heater in the absence of solar energy)

Tüm modlarda kurutulan ürünlerin nem miktarı ve ağırlık kontrolü yapılarak yaş baza ve kuru baza göre kuruma süreci kontrol edilecektir. Tasarım ile; hem konvensiyonel enerji kaynaklarına olan ihtiyaç hem de emisyonlar azaltılarak, neredeyse sıfır enerji kullanımı ile gün boyu /gece-gündüz) kurutma sisteminin

devamlılığı süreciyle sürdürülebilirliğe katkı sağlanacaktır.

Güneş enerjili kurutucularla ilgili literatürde yer alan bazı çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar Çizelge 1’de sunulmuştur.

Çizelge 1. Güneş enerjili kurutucularla ilgili literatürde yer alan bazı çalışmalar (Some studies in the literature on solar dryers)

Yazar	Gerçekleştirilen Çalışma
Memur [44]	Dilimlenmiş armutların, geleneksel kurutma sistemindeki kurutma süresi, güneş enerjili kurutucudakine göre 6 kat daha yavaş gerçekleşmiştir. Ayrıca, geleneksel kurutma sisteminde yer alan ürün su aktivite değerleri, güneş enerjili kurutucuya göre %10 daha fazladır. Bu anlamda güneş enerjili kurutucuda, kurutma prosesi daha etkin bir şekilde gerçekleşmiştir.
Aktaş ve Kara [45]	Güneş enerjili ve ısı pompalı bir kurutucu tasarlanarak, bu kurutucuda kivi kurutması işlemi yapılmıştır. 6 g su/g kuru madde içeriğindeki ürün muhtevisiyatı, 0,15 g su/g kuru madde içeriğine kadar 6,5 saat içerisinde kurutulmuştur. Ayrıca, deneyler esnasında ısı pompasının performans katsayısı (COP) değeri 3,02’ye kadar çıkarken, güneş kolektörünün verimi farklı sıcaklıklarda ortalama %56,7 olarak hesaplanmıştır.
Akman ve ark. [46]	Etkin ve ürün (kabak) muhtevisiyatı açısından sağlıklı bir kurutma prosesi sağlanması amacıyla, güneş enerjili bir kurutma sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir. 6 saatlik kurutma prosesi sonunda üründen %58 oranında nem uzaklaştırıldığı tespit edilmiştir.
Amin ve ark. [47]	Boya çamuru, güneş enerjili kurutma sisteminde parafin kullanılarak kurutulmuştur. Kurutma işlemi 8 saat sürmüş olup, ürünün nem muhtevisiyatı %56’dan %3,4’e düşmüştür.

**Çizelge 1. (devam)** Güneş enerjili kurutucularla ilgili literatürde yer alan bazı çalışmalar (Some studies in the literature on solar dryers)

Yazar	Gerçekleştirilen Çalışma
Sarı ve ark. [48]	PV/T paneller kullandıkları güneş enerjili bir kurutma sisteminde kereste kurutması prosesi üzerine çalışmada bulunulmuştur. Kendi enerjisini üreten, sıcaklık ve bağıl nem kontrollü bu sistem ile kerestelerden 1 ton nem alınması durumunda, 1,33 ton CO <sub>2</sub> -eşdeğer sera gazı emisyonunun önüne geçileceği vurgulanmıştır.
Arslan ve Aktaş [49]	Infrared konvektif kurutma teknolojisi ile PV/T teknolojisinin birleştiği bu çalışmada, sistemin enerji ihtiyacı tamamen güneşten sağlanmış ve fazla enerji akülerde depolanmıştır. Soğutulan PV panelin elektriksel verimi ortalama %13,49 olarak bulunmuş, güneş enerjisi kullanımıyla atmosfere 1,98 kg/h CO <sub>2</sub> salımı engelleneceği hesaplanmıştır.

Sonuç olarak literatüre bakıldığında çalışma kapsamında sunulan tasarımları karşılayabilecek yapıda, yani güneşin olmadığı zamanlarda da çalışabilecek enerji depolamalı, ısı geri kazanımlı ve infrared ısıtıcı sistemler ile ilgili çalışmaların kısıtlı olduğu görülmüştür.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Kurutma işlemi sırasında ürün kalitesini; kurutma süresi, kurutma sisteminin türü, kurutma sıcaklığı, kurutma havasının nemi ve kurutma sürekliliği gibi faktörler etkilemektedir. Açık havada güneş altındaki kurutma işlemlerinde birçok üründe kurutma işlemi güneşin durumu ve hava koşullarına bağlı olmak kaydı ile birkaç gün sürebilmektedir. Kurutma sistemlerinin kullanımı ile kurutma süreleri kısalmakta, nem ve sıcaklık gibi parametreler kontrol edilerek ürünlerde verilecek fire miktarları azaltılmakta, dolayısıyla süreç optimize edilebilmektedir.

Güneş enerjisi destekli kurutma sisteminde elektrik enerjisi tüketimi yalnızca sistemde yer alan; fanlar, infrared ısıtıcı, damper motorları ve bilgisayarın elektrik beslenmesinden kaynaklanmaktadır. Kullanılan elektrik enerjisinin, PV/T panel sayesinde karşılanması ve kurutma ünitesinde, konvansiyonel elektrik rezistansları yerine infrared lambalar kullanılması da sistem verimliliğinin artırılmasında öne çıkan parametrelerdendir.

Güneş enerjisi uygulamaları içerisinde yer alan PV/T panelli sistemlerde, ısıdan en faydalı şekilde yararlanmak kadar panel yüzeyini soğutmaya sağlayan uygulamalara da ihtiyaç bulunmaktadır. Bu soğutma uygulamaları sayesinde, PV/T panellerde yer alan fotovoltaiik hücrelerin artan sıcaklıkları kontrol edilerek, panel ve buna bağlı olarak sistem verimliliklerinde de artış sağlanmaktadır. Bu noktada faz değiştiren malzemelerin kullanımı, bahsedilen uygulamalar açısından etkili depolama tekniklerinden birisidir. Bu çalışma kapsamında sunulan eko tasarım kurutma sisteminde de FDM kullanımı ile enerji etkin kullanılacak ve PV/T panelin soğutulması ile panelin elektriksel verimliliği de arttırılacaktır.

Mevcut sistemlerin dezavantajlarını ortadan kaldırmaya yönelik tasarlanan yeni nesil eko kurutma sisteminde

güneş ışınımının yeterli olduğu zamanlarda PV/T panellerde üretilen enerji akü grubu ve FDM sayesinde depolanacaktır. Güneş ışınımının yetersiz kaldığı zamanlarda damperler, bilgisayar, infrared ve fanların enerjisi depolanan enerji sayesinde karşılanarak sistemin devamlılığı sağlanacaktır. Gündüz güneş ışınımının yüksek olduğu periyotta FDM kolektör, FDM depo sayesinde enerji depolanır iken PV/T kolektör yüzeyinin ısınması ile elektriksel verimlilikleri düşmektedir. Sistemin gün boyu (gündüz ve gece periyodu) çalışabilmesi için akülerin tam olarak şarj olması panellerin yüksek verimlilikte çalışmasına bağlıdır. Dış hava panel altından geçirilip panel soğutulmaya çalışılarak elektriksel verim artırılmakta, aynı zamanda ısınan hava da kurutma sisteminde ürünlerin kurutulmasında kullanılmaktadır. Kurutulacak ürün türüne göre kurutma odası girişinde ve çıkışında sıcaklık ve bağıl nem kontrolü yapılarak koşullar belirlenmekte ve kontrol sistemi sayesinde çalışma modu belirlenmektedir. Belirlenen mod ile üründe oluşabilecek kusurların engellenmesi ve kuruma sürelerinin azaltılmasının kontrol altına alınması amaçlanmıştır.

Eko kurutma sistemi sayesinde;

- Şebekeden ve konvansiyonel enerji kaynaklarından bağımsız, yenilenebilir enerji kaynağı kullanımı sağlanacaktır.
- Isı geri kazanım sistemi ile enerji tasarrufu sağlanarak sistemin aktif çalışma süresi uzatılacaktır.
- Gıdaların kurutulmasında infrared teknolojisi kullanılması; üstün ısı verim, yüksek ısı-kütle transferi oranları, kısa kuruma süresi, hızlı tepki süresi, ürün kalitesine olumlu etkisi ve düşük spesifik enerji tüketimi sağlamaktadır [50]. Bu sebeple, güneş ışınımının olmadığı zamanlarda, tüm kurutma havasının konvansiyonel elektrik rezistansı ile ısıtılması yerine, infrared ısıtıcılar ile ısıtılması sayesinde enerji daha verimli kullanılacak ve böylece sistemin genel veriminde de artış yaşanacaktır.
- PV/T panellerin soğutulması sayesinde, panellerin elektriksel verimliliği artırılarak akülerin daha kısa sürede enerji depolanması sağlanacaktır.
- Farklı modların kullanımı ile ortam ve çevre koşullarına uyumlu bir sistem oluşturularak, mod-1'de güneş enerjisi kullanımı ile kurutmanın, ısı ve elektriksel enerji depolanmanın sağlanması; mod-2'de

- kurutma işlemi için depolanan enerji (ısı ve elektrik) kullanılarak kurutma işleminin sürdürülebilirliği sağlanmış olacaktır. Karma modda ise ısı ve elektrik enerjisi kurutma sisteminde kullanılacak, ısı geri kazanımı yapılarak enerji verimliliği sağlanacaktır.
- Kontrol ünitesi sayesinde, insan duyularından bağımsız otomatik bir sistem geliştirilmiş olacaktır.
  - Kurutma sisteminde ürünlerin fire miktarı azaltılacak, ürün kalitesi artırılacaktır.
  - Farklı tip kurutma mekanizmaları kullanılarak ürün çeşitliliğinin artırılması sağlanacaktır.
  - Çevreci, yeşil, eko bir sistem tasarımı yapılarak, Paris İklim Anlaşması'nın hedeflerine katkı sağlanacaktır.
  - CO<sub>2</sub> gazı salımı azaltılarak karbon ayak izi küçültülecektir.
  - Ekonomik açıdan bakıldığında, tasarımda FDM kullanılması nedeniyle ek maliyetler oluşmakta ve bu da daha uzun bir geri ödeme süresi beklentisi oluşturmaktadır. Fakat, sistemde kullanılacak olan enerjinin PV/T paneller ile elde edilecek olması, sistemi ekonomik bir yapı haline getirmekte ve böylece FDM maliyetleri göz ardı edilebilecek seviyede kalmaktadır.

Yeni nesil kurutma sistemini literatürde gerçekleştirilen çalışmalardan ayıran en önemli özelliklerinden birisi, şebeke enerjisine gerek kalmadan sadece güneş enerjisini kullanarak, enerji depolayarak ve sistemde oluşan atık ısının ısı değiştiricisi ile geri kazanılarak tüketilen enerji miktarını önemli ölçüde azaltan bir sistem olmasıdır. Çalışmanın bir diğer yeniliği ise, kurutma uygulamasında kullanılan enerji miktarının azaltılması ve gün içerisinde güneş enerjisi desteği ile yapılan kurutma işleminin süresinin azaltılmasıdır. Böylece depolanan enerjiden faydalanılarak güneşin olmadığı zamanlarda kurutmanın yapılmasıyla daha kısa sürede kurutulmuş ürünler elde edilebilecektir. Enerji tasarrufu neticesinde önemli derecede CO<sub>2</sub> salımının da önüne geçilecektir. Geliştirilen bu sistemde, ürünlerin daha kısa sürede hijyenik ve kaliteli bir şekilde kurutulabileceği öngörülmektedir.

Yeni nesil eko kurutma sisteminin kendi enerjisini üreten, çevreye duyarlı, enerji verimli, farklı ürünlerin kurutulmasına olanak sağlayan esnek bir sistem olması, otomatik mod sistemi ile fire miktarını azaltmasını sağlaması açısından sonraki çalışmalara önemli katkıda bulunacağı öngörülmektedir. Ayrıca, sisteme ürün yükleme ve ürün altı titreşim sistemi ilave edilerek sıfır enerji tüketen, çevre dostu ve tam otomatik kontrollü bir kurutma sisteminin oluşturulması da mümkündür.

#### SİMGELER VE KISALATMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
NO <sub>x</sub>	Azot oksit
SO <sub>x</sub>	Kükürt oksit

PV	Fotovoltaik
PV/T	Fotovoltaik/Termal
COP	Performans katsayısı
FDM	Faz değiştiren malzeme
MPPT	Maksimum güç noktası takibi
SMER	Özgül nem çekme oranı, kg su/kWh
$\eta_{sistem}$	Sistem verimi, %
$\eta_e$	Elektriksel verim, %
$\eta_{th}$	Termal verim, %
$\eta_r$	Referans hücre verimi, %
$\beta$	Sıcaklık katsayısı, 1/K
$T_{panel}$	Kolektör yüzey sıcaklığı, °C
$T_r$	Referans hücre sıcaklığı, °C
$\dot{Q}_u$	Toplam ısı enerjisi, W
$A_c$	Cam alanı, m <sup>2</sup>
$G_t$	Güneş ışınımı, W/m <sup>2</sup>
$\tau$	Termal geçirgenlik
$\alpha$	Absorbsiyon, termal yayılım, m <sup>2</sup> /s
$U_L$	Toplam ısı kaybı, W
$T_p$	Soğurucu plaka sıcaklığı, °C
$T_a$	Ortam sıcaklığı, °C
$\dot{m}$	Kütleli debi, kg/s
$c_p$	Özgül ısı, kJ/kgK
$T_0$	Akışkan çıkış sıcaklığı, °C
$T_i$	Akışkan giriş sıcaklığı, °C
$F_R$	Isı kazanç faktörü,
$h_s$	Duyulur ısı entalpisi, kJ/kg
$c_s$	Katı faz özgül ısı, kJ/kgK
$T$	Sıcaklık, °C
$T_m$	Malzeme sıcaklığı, °C
$h_L$	Gizi ısı entalpisi, kJ/kg
$c_L$	Sıvı faz özgül ısı, kJ/kgK
$F'$	Kolektör verimlilik faktörü
$\dot{Q}_{toplamlam}$	FDM toplam ısı enerjisi kazancı, J/s
$\dot{Q}_S$	FDM katı faz ısı enerjisi kazancı, J/s
$\dot{Q}_{LT}$	FDM hal değişim enerjisi kazancı, J/s
$\dot{Q}_L$	FDM sıvı faz ısı enerjisi kazancı, J/s
$MC_{db}$	Kuru maddeye göre ürün nem içeriği, g su/ g kuru madde,



$M_i$	Kurutmadan önce ürün kütlesi, g
$M_d$	Kurutmadan sonra ürün kütlesi, g
$MR$	Nem oranı
$M$	Kurutmadan önce ürün kütlesi, g
$M_e$	Kurutmadan sonra ürün kütlesi, g
$M_o$	Başlangıçtaki ürün kütlesi, g

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

## YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Zafer DENİZ:** Literatür taramasını, kurutma sisteminin tasarımını ve analizini yaparak makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

**Mustafa AKTAŞ:** Literatür taramasını, kurutma sisteminin tasarımını ve analizini yaparak makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

**Yaren GÜVEN:** Literatür taramasını, kurutma sisteminin tasarımını ve analizini yaparak makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

**Buğra ŞENSOY:** Literatür taramasını, kurutma sisteminin tasarımını ve analizini yaparak makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Çay, V. V., Koçyiğit, F., Akyüz, M. K., Koçyiğit, Ş., "Güneş Enerjisi Destekli Kurutma Sistemleri ve Tarımda Kullanımı", *International Engineering Conference*, 302-314, Antalya, Türkiye, (2017).
- [2] Yıldız, G., Gürel, A. E., "PV/T Sistemler: Tipleri, Avantajları ve Uygulamaları", *TTMD Dergisi*, Temmuz-Ağustos, 30-38, (2019).
- [3] Şener, M., "Etkin Bir Havalı Güneş Kolektörünün Tasarımı ve Optimizasyonu", *Yüksek Lisans Tezi*, Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum, (2013).
- [4] Hou, L., Quan, Z., Zhao, Y., Wang, L., Wang, G., "An Experimental and Simulative Study on A Novel Photovoltaic-Thermal Collector with Micro Heat Pipe Array (MHPA-PV/T)", *Energy and Buildings*, 124: 60–69, (2016).
- [5] Canlı, M. E., "Güneş Işınımı Altında Faz Değiştiren Malzemenin Isı Depolama Davranışının Deneysel İncelenmesi", *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2017).
- [6] Dinçer, İ., Rosen, A., "Thermal Energy Storage Systems and Applications", *John Wiley & Sons*, 54-55, (2002).
- [7] Konuklu, Y., "Mikrokapsüllenmiş Faz Değiştiren Maddelerde Termal Enerji Depolama ile Binalarda Enerji Tasarrufu", *Doktora Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, (2008).
- [8] Demirbağ, S., Alay Aksoy, S., "İnorganik Madde İlave Edilerek Geliştirilmiş Termal Stabiliteye Sahip Isı Depolama Özellikli Mikrokapsül Üretimi ve Karakterizasyonu", *Tekstil ve Mühendis*, 20(92): 27-35, (2013).
- [9] Özdemir, Ç. Ö., Akgün, H., Özkan, A., Günkaya, Z., Banar, M., "Termal Enerji Depolamada Polimer-Nano Malzeme Katkılı Parafin Vakstan Üretilen Faz Değişim Malzemeleri Üzerine Bir Değerlendirme", *Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 27(2): 877-896, (2022).
- [10] Sharma, A., Chen, C. R., Vu Lan, N., "Solar-Energy Drying Systems: A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (6–7): 1185–1210, (2009).
- [11] Onat, A., "Kırmızı Biberin Havalı Güneş Kolektörleri ile Kurutulması", *Doktora Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2002).
- [12] Güngör, A., Özbaltalı, N., "Güneş Enerjili Kurutma Teknolojileri ve Uygulamalarda Gelişmeler", *8. Güneş Enerjisi Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi*, Bildiriler Kitabı, Mersin, (2019).
- [13] Ceylan, İ., Yılmaz, S., İnanç, Ö., Ergün, A., Gürel, A. E., Acar, B., Aksu, A. İ., "Determination of the Heat Transfer Coefficient of PV Panels", *Energy*, 175: 978–985, (2019).
- [14] Kabul, A., Yaşar, E., "Fotovoltaik/Termal (PV/T) Hibrit Sistemlerin Soğutma Tekniklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi", *SDU International Journal of Technological Science*, 9(1): 17–32, (2017).
- [15] Kazem, H. A., "Evaluation and Analysis of Water-Based Photovoltaic/Thermal (PV/T) System", *Case Studies In Thermal Engineering*, 13: 100401, (2019).
- [16] Ceylan, İ., Gürel, A. E., Demircan, H., Aksu, B., "Cooling of a Photovoltaic Module with Temperature Controlled Solar Collector", *Energy and Buildings*, 72: 96–101, (2014).
- [17] Preet, S., Bhushan, B., Mahajan, T., "Experimental Investigation of Water Based Photovoltaic/Thermal (PV/T) System with and without Phase Change Material (FDM)", *Solar Energy*, 155: 1104–1120, (2017).
- [18] Hosseinzadeh, M., Sardarabadi, M., Passandideh-Fard, M., "Energy and Exergy Analysis of Nanofluid Based Photovoltaic Thermal System Integrated with Phase Change Material", *Energy*, 147: 636–647, (2018).
- [19] Nabhan, B. J., "Using Nanoparticles for Enhance Thermal Conductivity of Latent Heat Thermal Energy Storage", *Journal of Engineering*, 21(6): 37–51, (2015).
- [20] Cellura, M., Ciulla, G., Lo Brano, V., Marvuglia, A., Orioli, A., "A Photovoltaic Panel Coupled with A Phase Changing Material Heat Storage System in Hot Climates", *PLEA 2008 – 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture*, 22–27, Dublin, (2008).
- [21] Stropnik, R., Strith, U., "Increasing the Efficiency of PV Panel with the Use of PCM", *Renewable Energy*, 97: 671–679, (2016).

- [22] Browne, M. C., Norton, B., McCormack, S. J., "Heat Retention of a Photovoltaic/Thermal Collector with PCM", *Solar Energy*, 133: 533-548, (2016).
- [23] Bhardwaj, A. K., Kumar, R., Kumar, S., Goel, B., Chauhan, R., "Energy and Exergy Analyses of Drying Medicinal Herb in a Novel Forced Convection Solar Dryer Integrated with SHSM and PCM", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45: 101119, (2021).
- [24] Shalaby, S. M., Bek, M. A., "Experimental Investigation of a Novel Indirect Solar Dryer Implementing PCM as Energy Storage Medium", *Energy Conversion and Management*, 83: 1-8, (2014).
- [25] El Khadraoui, A., Bouadila, S., Kooli, S., Farhat, A., Guizani, A., "Thermal Behavior of Indirect Solar Dryer: Nocturnal Usage of Solar Air Collector with PCM", *Journal of Cleaner Production*, 148: 37-48, (2017).
- [26] Le, V. V., Le, T. H., Nguyen, T. P., Duong, X. Q., "A Review of Solar Dryer with Phase Change Material as Sensible Heat Storage Mediums", *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 44 (7): 202-214, (2021).
- [27] Essalhi, H., Benchrif, M., Tadili, R., Bargach, M. N., "Experimental and Theoretical Analysis of Drying Grapes Under An Indirect Solar Dryer and in Open Sun", *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 49: 58-64, (2018).
- [28] Chaatouf, D., Salhi, M., Raillani, B., Amraoui, S., Mezrhab, A., "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, (2021).
- [29] Jain, D., Tewari, P., "Performance of Indirect Through Pass Natural Convective Solar Crop Dryer with Phase Change Thermal Energy Storage", *Renewable Energy*, 80: 244-250, (2015).
- [30] Günerhan, H., Hepbaşlı, A., "Utilization of Basalt Stone as a Sensible Heat Storage Material", *Energy Source*, 27: 1357-1366, (2005).
- [31] Alay, S., Göde, F., Alkan, C., "Isıl Enerji Depolama İçin Poli(Etil Akrilat)/Hekzadekan Mikrokapsüllerin Üretimi ve Karakterizasyonu", *Teknolojik Araştırmalar Dergisi*, 3: 33-46, (2009).
- [32] Utlu, Z., Aydın, D., Kıncay, O., "Yeşil Bina Uygulamalarında Gizli Isı Depolama Sistemlerinin Kullanılabilirliğinin Araştırılması", *Tesisat Mühendisliği*, 144: 61-68, (2013).
- [33] Lefebvre, D., Tezel, F. H., "A Review of Energy Storage Technologies with a Focus on Adsorption Thermal Energy Storage Processes for Heating Applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67: 116-125, (2017).
- [34] Esen, M., Ayhan, T., "Development of A Model Compatible with Solar Assisted Cylindrical Energy Storage Tank and Variation of Stored Energy with Time for Different Phase Change Materials", *Energy Conversion and Management*, 37(12): 1775-1785, (1996).
- [35] Esen, M., Durmuş, A., Durmuş, A., "Geometric Design of Solar-Aided Latent Heat Store Depending on Various Parameters and Phase Change Materials", *Solar Energy*, 62(1): 19-28, (1998).
- [36] Esen, M., "Thermal Performance of A Solar-Aided Latent Heat Store Used for Space Heating by Heat Pump", *Solar Energy*, 69(1): 15-25, (2000).
- [37] Zhang, X., Zhao, X., Smith, S., Xu, J., Yu, X., "Review of R&D Progress and Practical Application of the Solar Photovoltaic/Thermal (PV/T) Technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1): 599-617, (2012).
- [38] Ammar, A. A., Sopian, K., Alghoul, M. A., Elhub, B., Elbreki, A. M., "Performance Study on Photovoltaic/Thermal Solar-Assisted Heat Pump System", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 136: 79-87, (2019).
- [39] Al-Waeli, A. H. A., Sopian, K., Chaichan, M. T., Kazem, H. A., Hasan, H. A., Al-Shamani, A. N., "An Experimental Investigation of SiC Nanofluid as a Base-Fluid for a Photovoltaic Thermal PV/T System", *Energy Conversion and Management*, 142: 547-558, (2017).
- [40] Kalogirou, S. A., "Solar Energy Engineering Processes and Systems", *Academic Press*, 166-174, (2009).
- [41] Gürbüz, H., Ateş, D., "Egzoz Gazlarını Kullanan Termal Enerji Depolama Sisteminde RT35 Parafin Mumunun Erime ve Katlaşma Süreçlerinin Sayısal Analizi", *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9(2): 520-534, (2021).
- [42] Özdemir, M. B., Yatarkalkmaz, M. M., "Kayısı Kurutma İçin Düz ve Hapsedici Yüzeyle Güneş Destekli Kurutma Sistemlerinin Mukayese Edilmesi", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(4): 803-813, (2018).
- [43] Polat, T., Aktaş, M., Şahin, H. M., "Güneş Enerjisi ve Isı Pompalı Bir Kurutma Sistemi ile Çam Fıstığı Kozalağı Kurutulması", *Politeknik Dergisi*, 15(1): 1-7, (2012).
- [44] Memur, E., "Güneş Enerjili Gıda Kurutucusu Tasarımı ile Kurutma Performans Değerlendirmeleri", *YEKARUM*, 7(2): 48-57, (2022).
- [45] Aktaş, M., Kara, M. Ç., "Güneş Enerjisi ve Isı Pompalı Kurutucuda Dilimlenmiş Kivi Kurutulması", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimari Fakültesi Dergisi*, 28(4): 733-741, (2013).
- [46] Akman, H., Çerçi, K. N., Hürdoğan, E., Büyükalaca, O., "Güneş Enerjisi Destekli Bir Kurutma Sisteminin Tasarımı, İmalatı ve İlk Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi", *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 1(1): 1-9, (2018).
- [47] Amin, Z., Yüksel, G., Salihoğlu, G., Salihoğlu, N.K., "Güneş Enerjili Kurutma Sistemlerinde Parafin Kullanılarak Boya Çamurunun Kurutulması", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(1): 231-241, (2021).
- [48] Sarı, E., Güven, Y., Aktaş, M., "Güneş Enerjili Eko Tasarım Kereste Kurutma Sistemi", *Politeknik Dergisi*. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1299114>
- [49] Arslan, E., Aktaş, M., "4E Analysis of Infrared-Convection Dryer Powered Solar Photovoltaic Thermal Collector", *Solar Energy*, 208: 46-57, (2020).
- [50] Dolgun, E. C., Karaca, G., Aktaş, M., "Analysis of Intermittent Infrared Drying Using Heat Recovery with a Novel Control Methodology", *Journal of Food Process Engineering*, 43(10): 13491, (2020).