



## Use of Solar Energy Assisted Drying Methods in the Food Industry

Vildan Top<sup>1,a</sup>, İsmail Tontul<sup>1,b,\*</sup>, Selman Türker<sup>1,c</sup>

<sup>1</sup>Department of Food Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Necmettin Erbakan University 42090 Konya, Turkey

\*Corresponding author

| ARTICLE INFO   | ABSTRACT  |
|--|---|
| <p><i>Review Article</i></p> <p>Received : 14/07/2018<br/>Accepted : 11/07/2019</p> <p><b>Keywords:</b><br/>Solar energy<br/>Solar drying<br/>Active and passive dryers<br/>Energy storage<br/>Dried foods</p> | <p>Dried products are widely used from the past because of their long shelf life, rich nutrient content and availability. Solar or shade drying methods have become the most widely used drying technique from past to date, due to no equipment requirement, cost and simplicity. However, this drying method has some disadvantages such as long drying time, contamination risk and requirement of large area and heavy labor. In this review, various drying methods applied in food are summarized. Then, solar energy assisted drying methods were examined in detail. Finally, solar energy-assisted drying methods involving energy storage are examined. Solar energy assisted drying is a very advantageous technique for economical production. The most important advantages of this technique are that the system can be designed in many different ways in order to provide the desired characteristics. In addition, the availability of various energy storage units contributes to the availability of the system.</p> |

Türk Tarım – Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi 7(8): 1100-1112, 2019

## Güneş Enerjisi Destekli Kurutma Yöntemlerinin Gıda Endüstrisinde Kullanımı

| MAKALE BİLGİSİ  | ÖZ  |
|---|---|
| <p><i>Derleme Makale</i></p> <p>Geliş : 14/07/2018<br/>Kabul : 11/07/2019</p> <p><b>Anahtar Kelimeler:</b><br/>Güneş enerjisi<br/>Güneş enerjisi destekli kurutma<br/>Aktif ve pasif kurutucular<br/>Enerji deposu<br/>Kurutulmuş gıdalar</p> | <p>Kurutulmuş ürünler geçmişten günümüze uzun raf ömürleri, gıda bileşenleri açısından zengin içeriği ve kolay elde edilmeleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Herhangi bir ekipmana ihtiyaç duyulmaması, ekonomik ve basit kullanımı nedeniyle güneşte veya gölgede kurutma yöntemleri geçmişten günümüze en yaygın kullanılan kurutma tekniği olmuştur. Ancak bu kurutma yönteminin uzun süre alması, kontaminasyona açık olması, geniş alan gereksinimi ve yoğun işçilik ihtiyacı gibi dezavantajları bulunmaktadır. Bu derlemede öncelikle gıdalarda uygulanan çeşitli kurutma yöntemleri özetlenmiştir. Daha sonra güneş enerjisi destekli kurutma yöntemleri detaylı şekilde irdelenmiştir. Son olarak enerji deposu içeren güneş enerjisi destekli kurutma yöntemleri incelenmiştir. Güneş enerjisi destekli kurutma yöntemi ekonomik ürün eldesi için oldukça avantajlı bir teknik olarak öne çıkmaktadır. İstenilen özellikleri sağlamak amacıyla sistemin çok farklı şekillerde tasarlanabilmesi bu tekniğin en önemli avantajlarından. Ayrıca çeşitli enerji depolarının kullanılabilmesi sistemin kullanılabilirliğine katkıda bulunmaktadır.</p> |

<sup>a</sup> [vildantop93@gmail.com](mailto:vildantop93@gmail.com)  
<sup>c</sup> [selmanturker@gmail.com](mailto:selmanturker@gmail.com)

<sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1081-4166> | <sup>b</sup> [itontul@erbakan.edu.tr](mailto:itontul@erbakan.edu.tr)  
<sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1233-7906>

<sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8995-1886>



## Giriş

Gıdalar depolama ve dağıtım sırasında fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak değişime uğramaktadır (Karel, 1991). Bu değişimler gıdaların yapı, renk ve tatlarında istenmeyen değişimlere neden olmaktadır. Ayrıca aroma maddelerinin bozulması ve besin maddelerinin indirgenmesi gibi biyokimyasal reaksiyonlar da meydana gelebilmektedir (Ratti, 2001). Kurutma, gıdalarda bozulmaya sebep olan mikroorganizmaların ve kimyasal reaksiyonların durdurulması veya yavaşlatılması amacıyla uygulanan ve su aktivitesinin dolayısıyla yararlanılabilir su içeriğinin azaltıldığı işlem olarak tanımlanmaktadır. Evranuz (1998)'e göre kurutma gıda maddesinin raf ömrünü uzatmak, ürün hacminin küçültülmesi ile depolama ve taşımada ekonomi sağlamak ve yeni ürün formülasyonları geliştirmek amacıyla gerçekleştirilmektedir. Kurutma teknolojisi güneş enerjisi destekli sistemlerden, fırın kurutucular, tünel kurutucular, püskürtmeli kurutucular, tepsili kurutucular, silindirik kurutucular ile mikrodalga ve kızılötesi destekli kurutma gibi daha birçok gelişmiş yeni sistemlere kadar ilerletilmiştir (Ratti, 2001). Yeni geliştirilen teknolojiler yalnızca kuruma hızını arttırmak amacıyla değil aynı zamanda daha iyi kalitede bir ürün elde etmek amacıyla da uygulanmaktadır (Esper ve Mühlbauer, 1998). Bu nedenle son yıllarda kurutma işlemi sırasında kalite kaybının mümkün olduğunca azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik çalışmalar önem kazanmıştır.

Endüstriyel kurutucularda kullanılan enerji kaynağı olarak genellikle fosil yakıtları kullanılmaktadır. Ancak fosil yakıtlarının sınırlı olması, maliyeti ve çevreye zararları nedeniyle Dünya çapında fosil yakıtların kullanımının azaltılması planlanmaktadır. Bu nedenle, rüzgar enerjisi, jeotermal enerji ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Bu kaynaklar arasında güneş enerjisi hem ulaşım kolaylığı hem de maliyet açısından en çok tercih edilen enerji kaynağıdır.

## Kurutma Yöntemleri

Gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılan kurutma yöntemleri aşağıda özetlenmiştir.

### *Güneşte Kurutma*

Eski çağlardan bu yana en yaygın olarak kullanılan kurutma yöntemi güneş veya gölge bir alana serilen ürünün çevresel şartlara bağlı olarak 1-2 hafta içerisinde kurutulmasıdır. Herhangi bir yapay enerji kaynağı içermemesi nedeniyle en ekonomik kurutma yöntemidir. Ancak bu kurutma yönteminde kontaminasyon başta olmak üzere birçok sorun yaşanmaktadır. Yıl boyunca güneş enerjisinin sabit olmaması nedeniyle kurutma performansının farklı olması, ürünün haşere ve böcek gibi dış etkilere maruz kalması, kurutma yapmak için çok fazla alana ihtiyaç olması ve kurutmaya birlikte hafif bir fermentasyon meydana gelebilme riski güneşte kurutmanın dezavantajlarıdır (Cemeroğlu, 2009). Bu nedenlerle daha hızlı, hijyenik ve homojen kurutma sağlayan başta güneş enerjisi destekli kurutucular olmak üzere farklı kurutma metodlarının gelişimini desteklemiştir (Bingöl ve Devres, 2011; Doymaz, 2004).

### *Kabin (Tepsili) Kurutma*

Kabin tipi kurutucularda genellikle bütün veya dilimlenmiş ürünler temas yüzeyini arttıracak şekilde raflara dizilerek kurutulmaktadır. Kabin şeklindeki boşluk içinde yer alan ve ürünü taşıyan tepsiler sıcak havaya maruz bırakılmakta ve bu şekilde kuruma işlemi gerçekleşmektedir (Cemeroğlu, 2009). Sistem kesikli çalışmakta ve havanın tepsiler arasında dolaşması homojen sağlanmadığı durumlarda kurutma tekdüze olmamaktadır. Bu tip kurutucularda çıkış havasının bir kısmı taze hava ile karıştırılarak kurutma sisteminde tekrar kullanılmak suretiyle enerji ekonomisi sağlanmaktadır (Olgun ve Rzeyev, 2000).

### *Tünel ve Bantlı (Konveyör) Kurutma*

Tünel ve bantlı kurutucular sıcak hava akımında kurutma prensibi ile çalışan kurutma yöntemleri olup sürekli çalışan sistemlerdir. Tünel kurutucularda ürün vagonlara yüklenirken, bantlı kurutucularda ise ön işlemlerden geçen ürünler bant üzerinde kurutma sistemine girmektedir. Bu tip kurutucularda sıcak hava ürünlere paralel ya da zıt hareket ettirilebilmektedir. Tünel kurutucular ile karşılaştırıldığında daha pahalı olan bantlı kurutucular, fazla miktarda ürünün sabit kalitede kurutulmasına imkân vermektedirler (Salunkhe ve ark., 1991; Tang ve Yang, 2004).

### *Döner Kurutma*

Bu tip kurutucular bantlı veya tepsili kurutucularda kurutulması güç olan akışkan gıdaların kurutulmasında tercih edilmektedir. Döner kurutucularda yaş gıda, kurutucu tüp içerisindeki kanatçıklar yardımıyla besleme noktasından çıkış bölgesine doğru ilerlerken, kurutucu hava paralel ya da ters yönde gıda ile temas ettirilerek kurutma sağlanmaktadır (Yokuş, 2014).

### *Püskürterek Kurutma*

Akışkan gıdaların kurutulması için uygun bir yöntem olan püskürterek kurutucular çoğunlukla süt tozu, kahve, sabun ve deterjan üretiminde kullanılmaktadır (Gürlek ve ark., 2009). Püskürterek kurutma işlemi, atomizasyon, damlacık-sıcak hava teması ile kurutma ve kuru ürünün nemli havadan ayrılması olmak üzere üç temel adımda uygulanmaktadır (Tontul ve Topuz, 2017).

### *Dondurarak Kurutma*

Dondurarak kurutma ürün özelliklerini taze forma en yakın şekilde korumayı başaran bir kurutma metodu olup dondurulmuş üründe bulunan suyun düşük sıcaklık ve yüksek vakum altında süblimasyon ile uzaklaştırılması temeline dayanmaktadır (Telis ve Sobral, 2002).

### *Akışkan Yatak Kurutma*

Akışkan yatak kurutucular hava içinde hareket edip askıda kalabilen küçük boyutlu gıdalar için uygun bir kurutma yöntemidir. Akışkanlığı sağlayan sıcak havanın kurutulmak istenen ürün yüzeyinin her noktasına teması ile tekdüze bir kurutma gerçekleştirilmektedir (Coşkun, 2014; Yağcıoğlu, 1999).

### *Valsli Kurutma*

Tek ve çift valsli olmak üzere ikiye ayrılan valsli kurutucularda kurutulacak sıvı yüksek sıcaklıkta olan ve eksenini etrafında dönen valsler üzerine beslenerek kurutulmaktadır. Bu tür kurutucular yüksek viskoziteli ürünlerin kurutulması için uygun olup kurulum maliyetleri de düşüktür (Cemeroğlu, 2009).

### *Mikrodalga Kurutma*

Mikrodalga ile kurutmanın prensibi; materyaldeki polar molekülleri etkileyerek elektromanyetik enerjinin termal enerjiye dönüştürülmesidir (Vadivambal ve Jayas, 2007). Hava ısıtılmadığı ve materyal içinde ısınma gerçekleştiği için ısı etkinliği yüksek bir kurutma sistemidir. Bu kurutma yöntemi homojen nem dağılımına sahip materyallerin kurutulması için uygundur. Ancak nem miktarının azalmasına bağlı olarak kurutmanın ilerleyen aşamalarında bazı problemlere neden olmaktadır. Bu nedenle diğer yöntemlerle kombine olarak uygulanmaktadır (Karaaslan, 2012).

### *Ozmotik Kurutma*

Özellikle meyve ve sebze gibi gıdaların kurutulmasında kullanılan ozmotik kurutma, ürünün ozmoaktif maddelerin konsantrasyonunu azaltmaları için bekletilmesiyle ozmoz yoluyla suyun uzaklaştırılmasıdır (Us, 2006). Suyun uzaklaşması için faz değişimi gerçekleşmediği için enerji ihtiyacı oldukça düşüktür. Ancak kurutma sırasında ozmoaktif çözeltilerin meyveye difüzyonu sonucunda duyu özelliklerinde değişimler meydana gelmektedir (Cemeroğlu, 2009).

## **Güneş Enerjisi Destekli Kurutma**

Gelişmekte olan ülkelerde tarım ile uğraşan çiftçiler için motorlu fanlar veya elektrikli ısıtma kullanan gıda kurutma sistemleri hem yatırım hem de işletme maliyetleri açısından tercih edilmemektedir. Bunlara ek olarak fosil yakıtları doğaya zarar vermektedir. Bu nedenle rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi ve jeotermal enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Bunların arasından güneş enerjisi hem erişim kolaylığı sebebiyle hem de ekonomik açıdan en çok tercih edilen enerji kaynağıdır. Geçmişten günümüze çiftçilerin yaygın olarak kullandıkları geleneksel güneş altında kurutma bazı olumsuz etkilere sahiptir. Yüksek oranda ürün kaybı, yetersiz kuruma, mantar saldırıları, böcekler, kuşlar ve kemirgenlerin üründe meydana getirdiği zararlar, yağmur gibi doğa olaylarında kurutmaya ara verilmesi ve yoğun işçilik bu olumsuz etkilerden bazılarıdır. Güneş enerjisi destekli kurutucular bu olumsuz etkileri engellemesi nedeniyle önem kazanmıştır (Ekechukwu ve Norton, 1999). Güneş enerjisi destekli kurutucuların önemini ortaya koymak için birçok çalışma yapılmıştır. Gallali ve ark. (2000) üzüm, incir, domates ve soğanın güneşte kurutma ve güneş enerjisi destekli kurutma ile kül, nem, asitlik, toplam şeker ve C vitamini gibi bazı özelliklerinin değişimini incelemişlerdir. Güneş enerjisi destekli kurutma yönteminin analiz edilen kalite parametreleri açısından daha uygun olduğu sonucuna varmışlardır. Yağcıoğlu (1999), hem açık havada hem de güneş enerjisi destekli kurutucular ile defne yaprağını kurutmuş ve kuru ürün özelliklerini karşılaştırmıştır.

Çalışma sonucuna göre kurutma parametrelerinin kontrol edilememesi ve kurutma süresinin çok uzun olması nedeniyle açık havada kurutma istenmeyen bazı değişikliklere neden olmuştur. Ayrıca güneş enerjisi desteği ile kontrollü bir şekilde kurutma bu değişiklikleri azaltmıştır. Ayrıca yaprakların %10 nem içeriğine kadar kuruma süreleri güneş enerjisi destekli kurutmada güneşte kurutmaya oranla çok daha kısa sürdüğü ortaya konulmuştur.

## **Güneş Enerjisi Destekli Kurutucuların Sınıflandırılması**

Güneş enerjisi destekli kurutucular hava akışının taşınımı ve güneş ışınlarının tutulma şekline göre sınıflara ayrılmaktadırlar. Hava akışının taşınım şekline göre pasif (doğal taşınım) ve aktif (zorlanmış taşınım) kurutucular olmak üzere ikiye ayrılırlar. Güneş ışınlarının tutulma şekline göre ise doğrudan, doğrudan olmayan ve kombine tip kurutucular olmak üzere üç kısımda incelenmektedirler. Güneş enerjisi destekli sistemlerin sınıflandırılması Çizelge 1’de özetlenmiştir.

### *Işınlarının Tutulma Şekline Göre Sınıflandırma*

*Doğrudan güneş enerjisi destekli kurutucular:* Doğrudan kurutucularda ürün direkt olarak güneşin ışıklarına maruz kalmaktadır. Bu tür kurutucular ışığın neden olduğu oksidasyon reaksiyonlarının ürünlerde istenmeyen değişimleri (vitamin kaybı, enzim bozulması ve istenmeyen renk değişimleri) hızlandırması nedeniyle tercih edilmemektedirler. Bu sorunları elimine etmek amacıyla eğik bir yüzeyle solar radyasyonu alan kurutucular geliştirilmiştir. Ürün yüzeyel delikli tepsilere dizilerek güneş ışığına maruz bırakılmakta ve tepsiler arasındaki ısıtılmış havanın bağıl nemi düşmesine bağlı olarak kurutma kapasitesi yükselmektedir. Bu şekilde bütün tepsilerde tek düze bir kurutma sağlanmaktadır. Sera tipi, kubbeli ve çadır tipi olan bu tip kurutucular genellikle düşük kapasitelidir (Yılmaz, 2000). Bu tip kurutucular, basit ve ucuz olup kurutulmuş ürünü çevresel şartlardan korumaktadır. Ancak geniş alana ihtiyaç duymakta, üründen buharlaşan nem yüzeylerde yoğunlaşarak güneş ışınları etkisini azaltmakta ve ürün renginde değişimlere neden olmaktadır (Visavale, 2012).

Toğrul ve Pehlivan (2002) çalışmalarında doğrudan zorlamalı konveksiyonlu güneş kurutucusu kullanarak kayısıların kuruma davranışını incelemişlerdir. Logaritmik kurutma modelinin kayısıların güneşte kurutma eğrisini tanımlamak için en uygun model olduğunu bulmuşlardır.

Yapılan bir çalışmada, Bektaşî üzümü şekerinin kuruma özelliklerini değerlendirmek amacıyla doğal konveksiyon altında düşük maliyetli portatif bir solar kurutucu kullanılarak geleneksel kurutma yöntemi ile karşılaştırılmış ve doğrudan güneş enerjili kurutucu ile kuruma süresinde %62 azalma sağlandığı belirlenmiştir. Nem içeriğinin ise ıslak bazda %36,33’ten 8,33’e düştüğü gözlenmiştir. Son ürünün maliyeti bakımından da kar elde edildiği bildirilmiştir. Ayrıca doğrudan kurutucu ile kurutulmuş ürünlerin görünümü ve tadının geleneksel kurutmadan daha üstün olduğu gözlenmiştir (Kamble ve ark., 2011).

Diğer bir çalışmada patateslerin kurutulmasında doğrudan güneş enerjili kurutucular (piramit ve ağaç kurutucu) açık havada kurutma ile karşılaştırılmıştır.

Doğrudan güneş enerjili kurutucuların kurutma süresini 2-3 saat kısalttığı, ayrıca ürünü toz, toprak ve böcek gibi dış etkenlerden koruyarak son ürünlerdeki kalite kayıplarını azalttığı bildirilmiştir. Özellikle piramit kurutucunun hem ekonomik anlamda hem de ısı iletimini sağlaması açısından daha tercih edilebilir olduğu bildirilmiştir (Tefera ve ark., 2013).

**Dolaylı güneş enerjisi destekli kurutucular:** Dolaylı güneş enerjisi destekli sistemlerde kurutulacak ürün kapalı bir ortamda üst üste raflı bir sistemde bulunan farklı tepsilere tutulmakta ve ürünler bir kollektörde ısıtılmış hava etkisi ile kurutulmaktadır. Kurutma üstten gerçekleştiği için en alt tepsilerdeki ürünlerde kalite daha düşük olsa da dolaylı kurutucularda ürünler güneş ışınlarının radyasyonundan korunmaktadır. Güneş ışınları eğimli bir yüzey tarafından absorbe edilmekte ve havayı ısıtma amaçlı kullanılmaktadır. Isıtılan hava tepsilerdeki ürünler arasında geçerek bacadan dışarı atılmaktadır. Kurutucuda bulunan baca sistemi hava akışını hızlandırıcı etkiye sahiptir (Yılmaz, 2000). Dolaylı güneş enerjisi destekli kurutma ile kurutma şartları daha iyi kontrol edilmekte, daha yüksek verime sahip olmakta, daha kalın ürünlerin kurutulmasına imkan tanımakta ve ışığın neden olduğu zararlar önlenmektedir.

Çizelge 1 Güneş enerjisi destekli sistemlerin sınıflandırılması

Table 1 Classification of solar energy assisted drying systems

| Güneş ışınlarının tutulma şekline göre   | Hava dolaşımını sağlama türüne göre |
|--|-------------------------------------|
| 1. Pasif Kurutucular   | 1. Doğrudan Tip Kurutucular         |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Doğrudan tip pasif kurutucular <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kabin tipi pasif kurutucular</li> <li>▪ Sera tipi pasif kurutucular</li> </ul> </li> <li>• Dolaylı tip pasif kurutucular</li> <li>• Birleştirilmiş tip pasif kurutucular</li> </ul> |                                     |
| 2. Aktif Kurutucular   | 2. Dolaylı Tip Kurutucular          |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Doğrudan tip aktif kurutucular</li> <li>• Dolaylı tip aktif kurutucular</li> <li>• Birleştirilmiş tip aktif kurutucular</li> </ul>  |                                     |

**Karışık tip güneş enerjisi destekli kurutucular:** Karışık tip güneş enerjisi destekli kurutucularda güneş enerjisinden hem direkt hem de indirekt şekilde yararlanılmaktadır. Selçuk ve ark. (1974), karışık tip raflı güneş enerjisi destekli kurutucu tasarlamışlardır. Çalışmada kombine raf tipi kurutucu için matematiksel ısı ve kütle transfer bağıntıları sabit hava debisi için hesaplanmıştır. Deneysel veriler ile hesaplanan değerlerin sıcaklık için %3, nem için ise %8 farkla uyduğu ortaya konulmuştur.

Bolaji ve Olalusi (2008), patates kurutmak için karışık tip güneş enerjisi destekli bir kurutucu geliştirmişlerdir. Kuruma sonunda kuruma hızı, verimliliği ve kuru bazda uzaklaştırılan nem miktarları sırasıyla 0,62 kg/saat, %57,5 ve %85.4 olarak bildirilmiştir (Bolaji ve Olalusi, 2008).

#### Hava Dolaşımını Sağlama Türüne Göre

Güneş enerjisi destekli kurutucular hava dolaşımını sağlama türüne göre 2 gruba ayrılmaktadır (Ekechukwu ve Norton, 1999).

- Pasif kurutucular
- Aktif kurutucular

Yapılan bir çalışmada limon dilimleri, kapalı tip dolaylı güneş enerjisi destekli kurutucu kullanılarak kurutulmuştur ve sonuçlar, 60°C'de sıcak havayla kurutma ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, kapalı tip güneş kurutucusu kullanılarak kurutulmuş limon dilimlerinin duyuusal parametreler bakımından daha kaliteli olduğu bildirilmiştir (Chen ve ark., 2005). Rajagopal ve ark. (2014), koprayı (Hindistan cevizi çekirdeği) kurutmak için dolaylı aktif bir kurutucu geliştirmişler ve kurutucunun etkinliğini belirlemek için güneş altında kurutma ile karşılaştırmışlardır. Kopranın nem içeriğinin %52,3'ten %8'e düştüğü gözlemlenmiştir. Dolaylı güneş enerjili kurutucu ile kuruma süresinin kısaltıldığını belirtmişlerdir (Rajagopal ve ark., 2014). Lingayat ve ark. (2017) muz kurutmak amacıyla dolaylı tip bir güneş enerjisi destekli kurutma cihazı tasarlamışlardır. Güneş enerjisi destekli kurutucu, V oluklu yassı plakalı hava kolektöründen, izolasyonlu kurutma odasından ve egzoz bacasından oluşmaktadır. Üretilen kurutucu muz kurutulmasında denenmiş ve kurutucu boyunca tekdüzelik araştırılmıştır. Muzun nem içeriğinin, başlangıç değeri olan %356'den (kuru madde bazında) 1., 2., 3. ve 4. tepsi için sırasıyla %16,3; %19,5; %21,2 ve %31,2 (kuru madde bazında) son nem içeriğine ulaştığı bildirilmiştir.

Pasif kurutucularda (doğal taşınım) ısınan havanın yükselmesi prensibinden yararlanılırken, aktif kurutucularda (zorlanmış taşınım) elektrikli bir fan kullanılmaktadır (Ertekin ve Yıldız, 2001). Aktif ve pasif kurutucu şekilleri Çizelge 2'de verilmektedir.

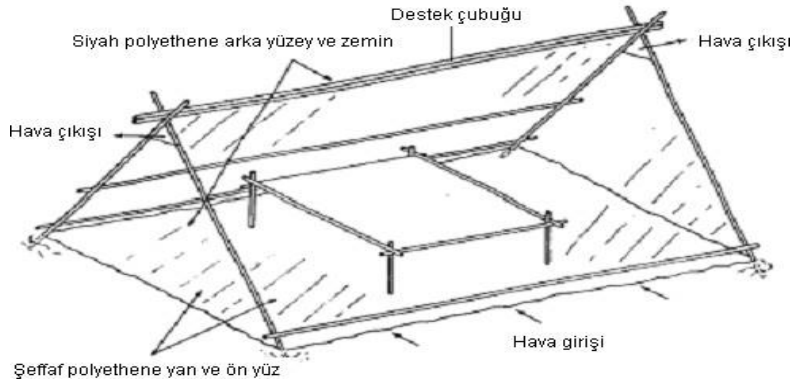
**Pasif (doğal taşınım) kurutucular:** Pasif tip kurutucular ilave bir enerji kaynağı olmaksızın güneş enerjisi ile çalışmaktadırlar. Bu tip kurutuculara; güneş kabinleri, çadır, sera ve baca tipi kurutucular örnek olarak verilebilirler. Kurulum maliyeti oldukça düşük ancak kurutma sıcaklığı kontrol edilememektedir. Bu tip kurutucularda hava akışını arttırmak amacıyla baca veya rüzgar türbini kullanılabilir (Ekechukwu ve Norton, 1999).

Pasif kurutuculara örnek olarak çadır tipi kurutucu Şekil 1'de verilmiştir. Çok düşük maliyet gerektiren çadır tipi kurutucularda kolektör ile kurutma deposu bir arada bulunmaktadır. Kullanılan çadırın amacı kurutulacak gıdayı yağmur, rüzgar gibi dış etkenlerden korumaktır (Yağcıoğlu, 1999).

Çizelge 2 Tipik aktif ve pasif kurutucu şekilleri (Anonim, 2006)

Table 2 Typical schematics of active and passive dryer

|          | Aktif | Pasif |
|----------|-------|-------|
| Doğrudan |       |       |
| Dolaylı  |       |       |
| Karışık  |       |       |



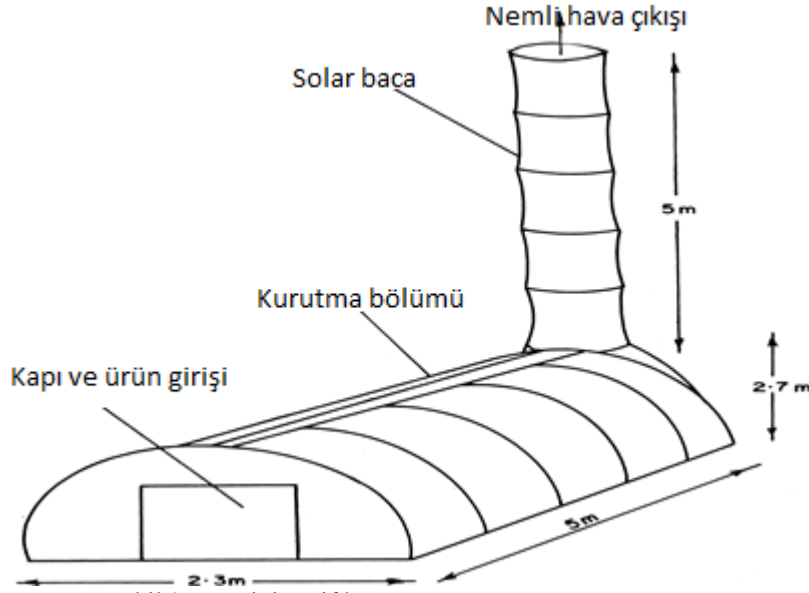
Şekil 1 Çadır tipi kurutucu (Yağcıoğlu, 1999)

Figure 1 Tent type dryer

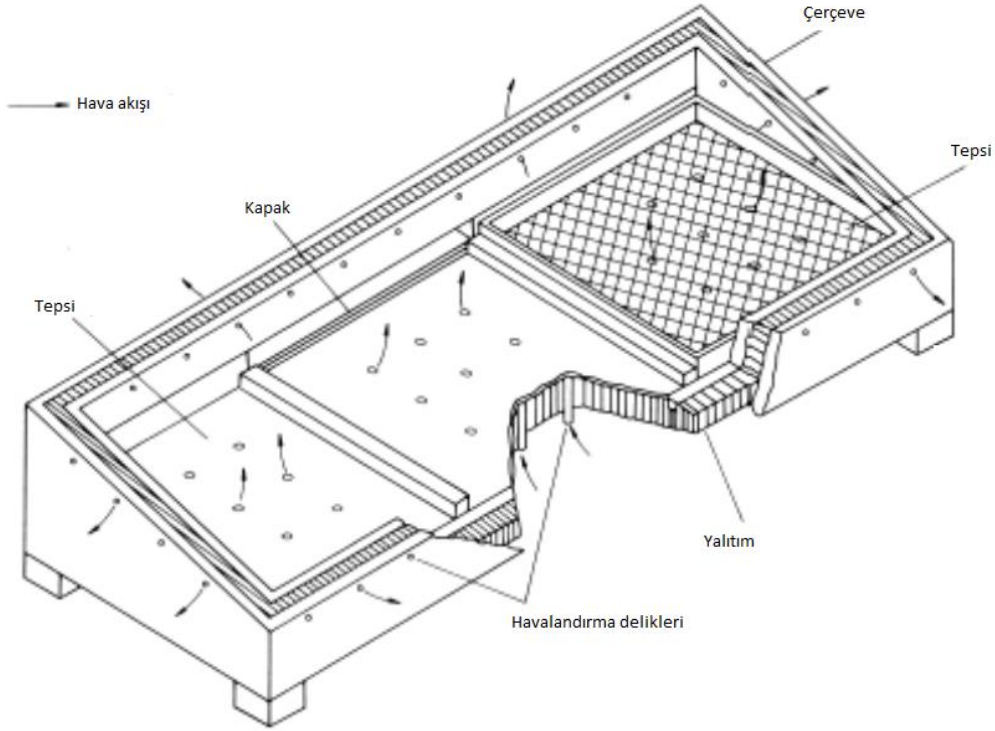
Pasif tip güneş enerjisi destekli kurutucuların bir diğer çeşidi ise sera tipi kurutucular olup kurutulacak ürün miktarı fazla olduğunda tercih edilmektedirler. Bu tip seraların dış örtüsü olarak UV ışınlarına karşı dayanıklı malzemeler kullanılmaktadır. Gelen güneş enerjisini daha iyi tutması için sera tabanı siyaha boyanmaktadır. Işığa karşı hassas bileşenler içeren ürünlerde güneş ışınlarının doğrudan ürünlerin üstüne temasını engellemek için ürünlerin üstüne siyah bir örtü serilmektedir. Sera içerisinde hava akışını sağlamak için, seranın kenarlarında ve tabanında, dış ortamın havasının girişi için delikler açılmakta ancak bu açıklıklardan herhangi istenmeyen yabancı madde vb. girmemesi için ağ ile kapatılmaktadır

(Tarhan ve ark., 2007). Şekil 2' de sera tipi pasif kurutucu şekli verilmiştir.

Kaewkiew ve ark. (2012) çalışmalarında biberleri kurutmak için büyük ölçekli sera tipi bir güneş kurutucu performansını araştırılmışlardır. Parabolik şekilli, polikarbonat tabakalarla kaplı ve 9 adet fana sahip kurutucu  $8 \times 20$  m<sup>2</sup>'lik beton bir alana kurulmuştur. İlk nem içeriği %74 olan biberler açık havada beş gün içinde kurumuşken, tasarlanan kurutucu ile 3 gün içinde kurutulmuştur. Bu kurutucuda kurutulmuş biber her türlü haşere, böcek ve yağmurdan tamamen korunmuştur. Buna ek olarak, daha kaliteli biberlerin elde edildiği bildirilmiştir.



Şekil 2 Sera tipi pasif kurutucu (Tarhan ve ark., 2007)  
Figure 2 Greenhouse type passive dryer



Şekil 3 Güneş enerjisi destekli kabin kurutucu (Tarhan ve ark., 2007)  
Figure 3 Solar energy assisted cabinet dryer

Kabin tipi kurutucular belirli bir eğimle kapanan bir kapak, kaplama malzemesi olarak tek veya iki kat saydam örtü, yalıtılmış yan yüzeyler ve taban ile ahşap veya metal sacdan oluşan yandan görünüşü yamuk şeklinde olan basit yapıları kurutuculardır (Şekil 3). Havalandırma amaçlı tabanına, ön ve arka kenarlarına delikler açılmaktadır. Bu deliklerden dış ortamdaki havanın içeri girmesi ve ısınmış havanın arkada bulunan üst deliklerden çıkması ile hava akışının sağlanmaktadır. Kurutucunun iç yüzeyleri gelen güneş enerjisini daha iyi tutmak için siyaha boyanmaktadır (Tarhan ve ark., 2007).

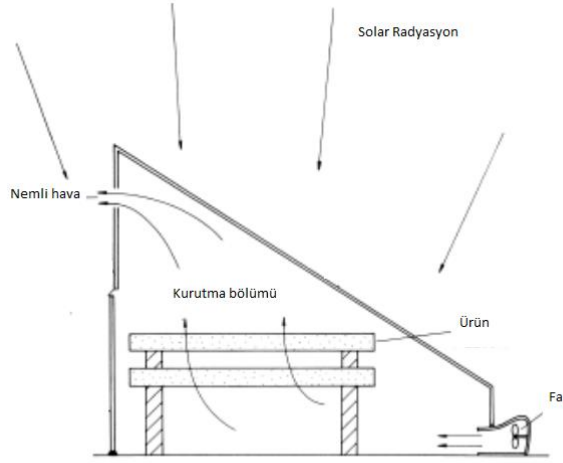
Yaşartekin (1991), kabin tipi güneş enerjisi destekli kurutucu ile elmaları kurutmuş ve kurutucunun kullanım olanaklarını, kurutma parametrelerini, ürünün kalite özelliklerini güneşte kurutma ile karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışma sonucunda kuruma hızının düşük olduğu belirlenmiş ve bu durumun kurutucuda dolaşan havanın yavaş olmasından kaynaklandığını değerlendirilmiştir. Bayhan (2011), tez çalışmasında iki farklı kabin tipi güneş enerjisi destekli kurutucuda eşit ağırlıkta nane yapraklarının kuruma karakteristiklerini incelemiştir. Aynı tip ve eşit miktarda ürünler her iki

sistemde de kurutularak kurutma sürecini etkileyen parametreler karşılaştırılmıştır. İlk kurutma sisteminde 40-60-70°C sıcaklık ve 0,8-1,5 m/s hava hızlarında ızgara altından, diğer sistemde ise 60°C sıcaklık ve 0,8-1,5 m/s hava hızlarında ızgara üzerinden üflenerek yapılmıştır. Sonuç olarak ızgara üzerinden üflenerek kurutma yapan cihazda yapılan kurutmanın diğerine oranla daha hızlı olduğu ve kurutma süresinin daha kısa olduğu sonucuna varılmıştır.

Yapılan bir çalışmada doğrudan pasif güneş enerjisi destekli bir kurutucu tasarlanmıştır. 100 kg tapyoka nişastası 2 gün boyunca kurutmaya tabi tutulmuştur. Bu kapasitede kurutma gerçekleştirmek için minimum 7.56 m<sup>2</sup> kollektör alanı gerekli olduğu belirtilmiştir. Kurutucu içinde hava sıcaklığı 32°C ve bağıl nem ise %74 olarak bildirilmiştir (Ogheneruona ve Yusuf, 2011). Eke (2013) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, doğrudan pasif güneş enerjili kurutucu geliştirilmiştir. Bamyacı, domates ve havuç kurutularak kuruma davranışları açık havada

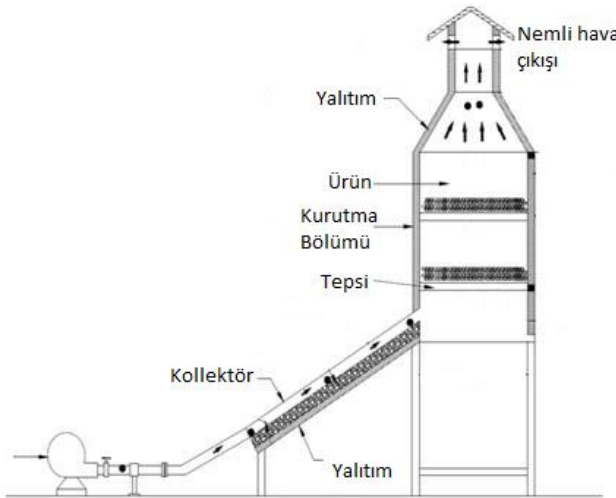
kurutma ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak dilimlenmiş domates, havuç ve bamyanın kurutma sürelerinin açık havada kurutmaya oranla sırasıyla %54,55; 52,88 ve 50,98 oranında kazanç elde edildiği bildirilmiştir. Pasif kurutucuda kurutma ile domates, havuç ve bamyacı için sırasıyla %21,80; 21,18 ve 24,95 oranında kuruma verimi elde edilirken, açık havada kurutmada %10,59; 12,71 ve 15,19 oranında kurutma verimi elde edilmiştir. Sebzelerin kurutulmasında en iyi sonuçların pasif kurutucu ile elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

*Aktif (zorlanmış taşınım) kurutucular:* Aktif kurutucularda hava dolaşımı elektrikli bir fan yardımıyla sağlanmaktadır (Şekil 4 ve Şekil 5). Böylelikle kurutma pasif kurutuculara oranla daha hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Ancak bu tip kurutucular fan elektrik enerjisi ile çalıştığı için her alanda kullanım mümkün olmamaktadır. Genellikle kurutulacak ürünün fazla olduğu durumlarda tekdüze ve hızlı kurutma sağlamak amacıyla tercih edilmektedir (Ekechukwu ve Norton, 1999).



Şekil 4 Aktif doğrudan güneş enerjisi destekli kurutucu (Ekechukwu ve Norton, 1999)

Figure 4 Active direct solar energy assisted dryer



Şekil 5 Aktif dolaylı güneş enerjisi destekli kurutucu (Kant ve ark., 2016)

Figure 5 Active in-direct solar energy assisted dryer

Gürlek ve ark. (2009) çalışmalarında tasarladıkları aktif tünel tipi güneşli kurutucunun etkinliğini domateste test etmişlerdir. Kurutma boyunca, kurutma hava sıcaklığı, bağıl nem, hava debisi, güneş ışınım değeri gibi parametreler ve kurutucunun farklı noktalarından alınan numunelerdeki kütle kayıplarına periyodik olarak izlenmiştir. Ayrıca en uygun ince tabaka kurutma modeli de belirlenmiştir. İstatistiksel analiz sonuçlarına göre deneysel kurutma verilerine en iyi uyum sağlayan modelin iki terimli (*two-term*) model olduğu sonucuna varılmıştır. El-Sebaei ve Shalaby (2013) dolaylı aktif güneş enerjisi destekli kurutma cihazı tasarlamışlardır. Sistem, bir kurutma odasına bağlı, çift geçişli, V oluklu plakalı bir güneş hava ısıtıcısından oluşturulmuştur. Isıtılan havayı kurutma odasına vermek için bir fan kullanılmıştır. Başlangıç sıcaklığı 29°C'de kekik (başlangıçtaki nem içeriği %95) ve nane (başlangıçtaki nem içeriği % 85) ile kurutma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Kekik ve nane için istenilen nem içeriğine sırasıyla 34 ve 5 saat sonra ulaşmışlardır. İncelenen ürünlerin kuruma davranışını tanımlamak amacıyla uygun modeli belirlemek amacıyla on dört matematiksel model test edilmiştir. En uygun model olarak nane için Midilli ve Küçük modeli, kekik için ise Page ve modifiye Page modelleri olarak bildirilmiştir. ELkhadraoui ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada aktif sera tipi kurutucunun performansını kırmızıbiber ve sultana üzümü ile araştırmışlardır. Kurutucu düz plakalı güneş kolektörü ve şapel şeklindeki bir sera içermektedir. Tasarlanan ve imal edilen kurutma sisteminin, kırmızıbiber ve üzümün kuruma süresini güneşte kurutmaya göre sırasıyla 7 ve 17 saat kısalttığı ortaya koymuşlardır.

Rabha ve ark. (2017) dolaylı tip aktif güneş tüneli kurutucusunda ve açık güneş altında kurutulan biberin kuruma özelliğine ilişkin karşılaştırmalı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kurutucu, seri bağlanmış iki adet çift geçişli güneş hava ısıtıcısı, bir yarı-sürekli tip tünel kurutucu, bir kabuk ve boru ısı eşanjörü ve bir fan dan oluşmuştur. Güneş enerjisi destekli kurutucuda ve açık güneş altında kurutulan biber örneklerinin nem içeriği sırasıyla 123 saat ve 193 saat istenen düzeye düşürülmüştür. Kurutmayı ifade eden modeli seçmek için, literatürde mevcut olan 11 farklı ince tabaka kurutma modeli, deneysel nem oranı verilerini ifade etmek için denemiştir. Bu modeller arasında güneşte kurutma için Page ve modifiye Page modeli ve güneş enerjisi destekli kurutma için Midilli ve Küçük modeli uygun bulunmuştur. Ghazanfari ve ark. (2003) çalışmalarında aktif kurutucu tasarlayarak antep fıstığının kuruma parametrelerini incelemişlerdir. Kurutma sonunda ürünün nem içeriğini %21'den %6'ya düşürmüşlerdir. Kurutma sabitini Fick ve üstel model kullanılarak belirlemişlerdir. Yapılan başka bir çalışmada kırmızı ve yeşil biberleri kurutmak amacıyla aktif (zorlanmış taşınım) güneş tüneli kurutucular kullanılmıştır. Kullanılan kurutucunun içerideki havanın salınımını sağlayan iki ayrı fanı bulunmaktadır. Aktif kurutucu geleneksel güneş altında kurutma yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Kırmızı biberlerin aktif kurutucu ile 20 saatte, güneş enerjili kurutucu ile ise 32 saatte, yeşil biberlerin ise aktif kurutucu ile 20 saatte geleneksel kurutma yöntemi ile ise 35 saatte istenilen nem içeriğine kadar kurutulduğu ortaya koyulmuştur. Sonuç olarak aktif kurutucuların kurutma süresini kısaltarak ürünün rengine

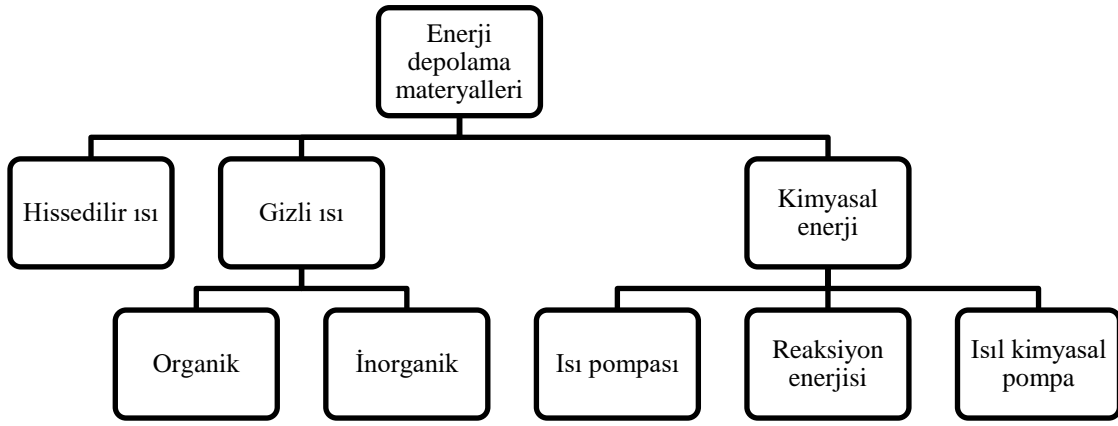
ve tadında meydana gelebilecek olumsuz değişiklikleri kısıtladığı sonucuna varılmıştır (Hossain ve Bala, 2007). El-Beltagy ve ark. (2007) çalışmalarında sitrik asit, askorbik asit ve sodyum metabisülfid ile muamele ettikleri çilek örneklerini ince tabakalı zorlanmış taşınım bir kurutucuda kurutma işlemine tabi tutmuşlardır. Gerekli kurutma süresini bütün, yarım, çeyrek ve disk şeklindeki çilekler için sırasıyla 28, 26, 20 ve 24 saat olarak belirlemişlerdir. Çalışmaları sonucunda aktif kurutma için Newton modelin en uygun olduğu sonucuna varmışlardır. Guzman-Valdivia ve ark. (2014) çalışmalarında içerisinde hava akımını sağlamak amacıyla küçük fanlar bulunan aktif bir kurutucu tasarlayarak Şili biberin kuruma davranışını incelemişlerdir. Aktif kurutucuyu geleneksel kurutma yöntemi ile karşılaştırmışlardır. Şili biberin yaş bazda nem miktarını %84'den %10'a düşürmek için gerekli sürenin aktif kurutucu ile %27 azaltıldığını bildirmişlerdir. Ayrıca aktif kurutucu ile kurutulan nihai ürünün kalitesinin güneş altında kurutulan üründen daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Diğer bir çalışmada zorlanmış taşınım kurutucu tasarlanarak acı kabağın kurutma davranışını açıklamak için farklı kurutma modelleri kullanılmıştır. Sonuçlar açık havada kurutma ile karşılaştırılmıştır. Zorlanmış taşınım kurutucu ile 7 saatte nem içeriğinde %92'den %9'a düşüş sağlanırken, açık havada kurutma ile bu düşüş ancak 10 saatte sağlanabilmiştir. Kurutma verimi ise zorlanmış ve açık havada kurutma için sırasıyla %22 ve %19 olarak belirlenmiştir. İstatistiksel parametreler açısından İki terim ve Midilli-Küçük modeli, sırasıyla aktif kurutucu ve açık havada kurutma için en uygun modeller olduğu bildirilmiştir. Aktif kurutucuyla kurutma ile açık havada kurutmaya kıyasla duyuusal ve fiziksel özellikler bakımından daha kaliteli ürün eldesi sağlandığı sonucuna varılmıştır (Vijayan ve ark., 2016).

### Enerji Deposu İçeren Solar Kurutucular

Güneş enerjisinin bol olduğu dönemlerde ısının bir kısmının içinde depolandığı enerji depolarından faydalanılarak ihtiyaç halinde depolanan bu ısı kurutma havasının ısıtılmasında kullanılmaktadır. Böylece, güneş enerjisinin olmadığı veya yetersiz olduğu dönemlerde de kurutma yapılabilir. Ayrıca güneş enerjisinin çok fazla olduğu dönemlerde bu enerjinin bir kısmı depolandığı için ürünün aşırı sıcak havaya maruz kalıp zarar görmesi engellenmektedir. Bu tip kurutucularda enerjiyi depolamak amacıyla farklı materyaller kullanılmaktadır (Şekil 6).

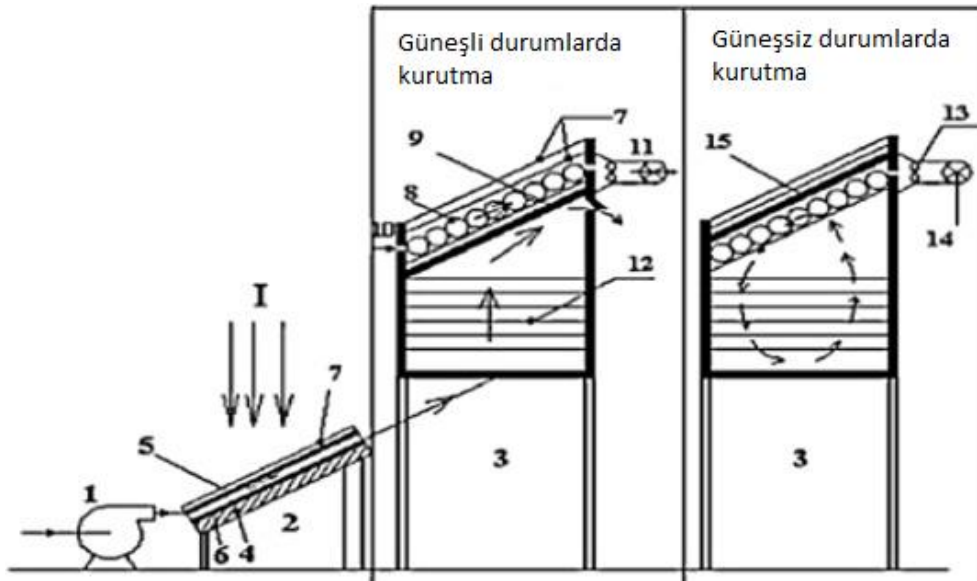
Bu sistemlerde enerji depolayacak materyal ya güneş panellerinin altına yerleştirilmekte ya da kurutma kabini içerisinde bulunmaktadır. İlk durumda güneş enerjisi azaldığında hava materyal arasından geçerek ısınmakta, ikinci sistemde ise hava çıkışa yerleştirilmiş bir fan vasıtasıyla tekrar kullanılmaktadır. Bu tip bir sisteme örnek Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere bu tip kurutucularda hava çıkışına iki taraflı çalışan bir fan yerleştirilmiştir. Güneşli durumlarda bu fan hava çıkışını sağlamak üzere çalışırken, güneşin olmadığı durumlarda havanın kurutucu içinde tekrar sirkülasyonunu sağlamaktadır. Böylece enerji depolayan materyalin enerjisi kurutulacak ürüne aktarılmaktadır.





Şekil 6 Enerji depolama materyallerinin sınıflandırılması (Agrawal ve Sarviya, 2016)

Figure 6 Classification of energy storage materials



Şekil 7 Enerji depolu aktif kurutucu (Shanmugam ve Natarajan, 2007)

1. fan, 2. düz plaka güneş hava toplayıcı, 3. kurutma odası, 4. yalıtım, 5. absorber plaka, 6. alt plaka, 7. şeffaf kapak, 8. Enerji deposu, 9. kontrplak, 10. hava girişi, 11. hava çıkışı için kanal, 12. kurutma tepsileri, 13. tersinir fan, 14. vana, 15. kontrplak.

Figure 7 Active dryer with energy storage

1. Blower, 2. Flat plate solar air collector, 3. Drying chamber, 4. Insulation, 5. Absorber plate, 6. Bottom plate, 7. Transparent cover, 8. Desiccant bed, 9. Plywood, 10. Air inlet, 11. Duct for air exit, 12. Drying trays, 13. Reversible fan, 14. Valve, 15. Plywood.

#### Hissedilir Isıdan Faydalanan Enerji Deposuna Sahip Güneş Enerjisi Destekli Kurutucular

Fazla enerjiyi depolamak amacıyla kullanılan ilk yöntem güneş enerjisinin bir kısmının sıvı ya da katı bir materyali faz değiştirmeden ısıtmak amacıyla kullanılmasına dayanmaktadır. Bu amaçla yaygın olarak kullanılan materyaller olarak yüksek özgül ısıya sahip materyaller kullanılmaktadır (Kant ve ark., 2016). Bu materyaller güneşli durumlarda aşırı ısınmayı önlemekte, güneşsiz durumlarda ise sabit sıcaklıkta kurutmanın devam etmesine imkân vermektedir (Vijayan ve ark., 2016). Bu yaklaşımda kullanılacak farklı materyaller ve özellikleri Çizelge 3'de verilmiştir.

Ayyappan ve ark. (2016) sera tipi solar kurutucuda Hindistan cevizi kurutulması işleminde beton, kum ve kayanın enerji depolama materyali olarak kullanılabilirliğini kıyaslamışlardır. Çalışma sonuçlarına göre açıkta kurutma 174 saat sürerken, enerji depolu güneş enerjisi destekli kurutma 53-78 saatte gerçekleşmiştir. Enerji deposu olarak kaya ve kum kullanımı beton

kullanımına göre daha yüksek etkinlik sağlamıştır.

Bitkisel materyal kurutmak amacıyla geliştirilen düzlemsel plakalı bir pasif kurutucuda enerji deposu olarak granit parçaları kullanılmıştır. Granit parçaları güneşsiz saatlerde stabil hava sıcaklığı sağlayarak kurutma etkinliğini arttırmıştır. Geliştirilen kurutucu ile 24 saatte 95 kg soğan kurutulması mümkün olmuştur (Jain, 2007). Başka bir çalışmada ise enerji deposu olarak çakıl kullanımının günlük olarak 4 saat daha fazla sabit kurutma sıcaklığı sağladığı belirlenmiştir (Mohanraj ve Chandrasekar, 2009).

#### Gizli Isıdan Faydalanan Enerji Deposuna Sahip Güneş Enerjisi Destekli Kurutucular

Bu tip enerji depolarında materyal güneşten sağlanan enerji ile faz değiştirmektedir. Böylece materyalin faz değiştirme entalpisi depolanabilmektedir. Teorik olarak katı-sıvı ve sıvı-gaz fazlarının kullanılması mümkün olmasına rağmen genel olarak katı-sıvı faz değişimi yapan materyaller daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Sıvı-gaz

değişimlerinde hacim artışı, sistemi kompleks ve güvenilir hale getirmektedir. Faz değiştiren materyallerin enerji deposu olarak kullanılmasının en önemli avantajı faz değişimi için gerekli enerjinin birçok materyalin hissedilir ısısının yükseltilmesi için gerekli enerjiden çok daha büyük olmasıdır. Böylece daha az

materyal kullanılarak daha fazla enerji depolamak mümkün olmaktadır (Kant ve ark., 2016). Nitekim Kaygusuz (1995) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada faz değiştiren materyalin ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) depoladığı enerjinin su ve kaya tarafından depolanan enerjiye göre önemli ölçüde daha fazla olduğu belirlenmiştir (Şekil 8).

Çizelge 3 Enerji depolama amacıyla kullanılan materyaller ve özellikleri (Ayyappan ve ark., 2016; Kant ve ark., 2016)  
Table 3 Energy storage materials and their properties

| Materyal     | Tip          | Sıcaklık aralığı | Yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ ) | Özgül ısı ( $\text{J/kg.K}$ ) |
|--------------|--------------|------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Kaya         | Katı         | -                | 2560                         | 879                           |
| Kum          | Katı         | -                | 1555                         | 800                           |
| Tuğla        | Katı         | -                | 1600                         | 840                           |
| Beton        | Katı         | -                | 1900-2300                    | 880                           |
| Granit       | Katı         | -                | 2640                         | 820                           |
| Alüminyum    | Katı         | -                | 2707                         | 896                           |
| Dökme demir  | Katı         | -                | 7900                         | 837                           |
| Su           | Sıvı         | 0-100            | 1000                         | 4190                          |
| Caloria HT43 | Sıvı yağ     | 12-260           | 867                          | 2200                          |
| Motor yağı   | Sıvı yağ     | 160'a kadar      | 888                          | 1880                          |
| Etanol       | Organik sıvı | 78'e kadar       | 790                          | 2400                          |
| Propanol     | Organik sıvı | 97'e kadar       | 800                          | 2500                          |
| Butanol      | Organik sıvı | 118'e kadar      | 809                          | 2400                          |
| İsotunaol    | Organik sıvı | 100'e kadar      | 808                          | 3000                          |
| İsopentanol  | Organik sıvı | 148'e kadar      | 831                          | 2200                          |
| Oktan        | Organik sıvı | 126'ya kadar     | 704                          | 2400                          |

Faz değiştiren materyaller ile hava arasındaki etkileşimi arttırmak amacıyla genellikle ısı değiştiriciler kullanılmaktadır. Örnek bir kurutma cihazı tasarımı Şekil 9'da verilmiştir.

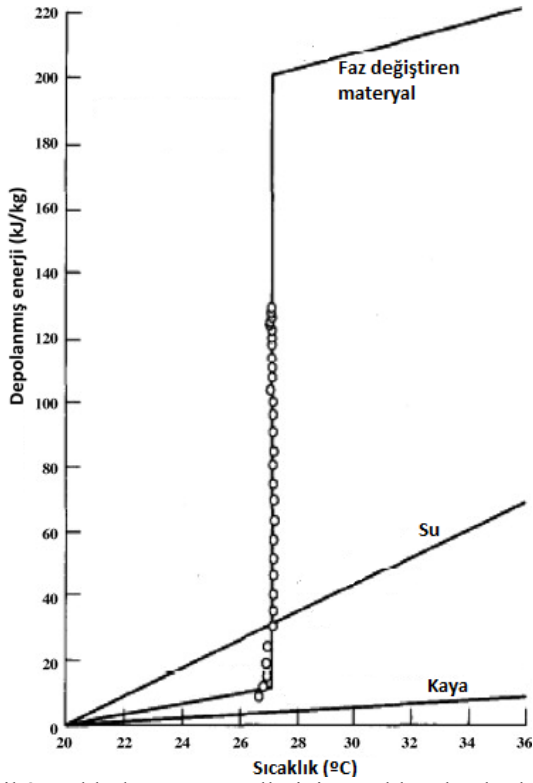
Faz değiştiren materyal olarak çok farklı materyaller kullanılabilir. Bu materyaller organik ve inorganik olarak ikiye ayrılmaktadır. Organik faz değiştiren materyal olarak yaygın olarak parafinler ve yağ asitleri kullanılmaktadır. Organik materyaller faz ayrımı olmadan tekrar tekrar eriyip donması, az veya hiç süper soğuma olmadan kendiliğinden kristalleşebilmesi ve korozif olmaması nedeniyle öne çıkmaktadır (Sharma ve ark., 2009). İnorganik materyaller ise genellikle hidratlı tuzlar ve metallerdir. Hidratlı tuzlar zayıf çekirdeklenme özelliklerine sahiptir. Bu nedenle kristalizasyon başlamadan önce önemli bir süper soğuma evresi gereklidir. Ayrıca yapının içerdiği su miktarının azlığı nedeniyle aşırı doymuş çözelti oluşabilme ve faz ayrılması gerçekleşebilmektedir. Böylece donma erime döngüleri arasında etkinlik kayıpları meydana gelmektedir. Bu sorunların aşılması için çalışmalar devam etmektedir. Faz değiştiren materyal olarak kullanılacak birçok metalin gizli ısısı oldukça düşük olması en önemli dezavantajdır (Sharma ve ark., 2009).

Parafin gıda kurutma çalışmalarında en yaygın olarak kullanılan faz değiştiren materyal olarak dikkati çekmektedir. Song ve ark. (2011) üzüm kurutmada enerji deposu olarak parafin kullanılmasının kurutma süresini enerji deposuz kurutmaya göre yarı yarıya kısalttığını bildirmiştir. Tatlı patatesin dolaylı aktif kurutucu ile kurutulmasını konu alan çalışmalarda parafin içeren enerji depoları %34-40 enerji tasarrufu sağlamıştır (Devahastin ve Pitaksuriyarat, 2006). Diğer çalışmalarda parafin içeren enerji deposu kullanımı ile kurutma etkinliğini %33-50 arasında arttırdığı bildirilmektedir (Aumporn ve ark., 2018; El-Sebaai ve Shalaby, 2017).

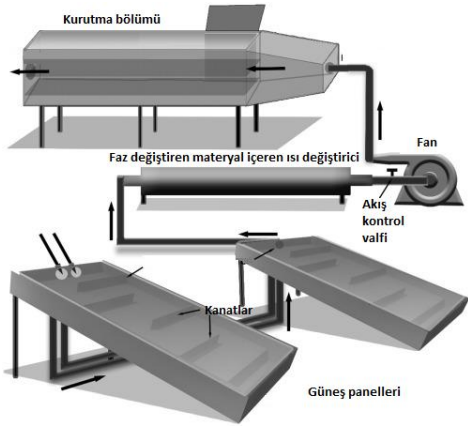
Yapılan bir çalışmada enerji depolama ortamı olarak parafin kullanılarak yeni bir dolaylı güneş enerjisi destekli kurutucu tasarımı deneysel olarak incelenmiştir. Hem enerji deposu bulunan hem de bulunmayan kurutma sistemlerinde fesleğen ve zakkum kurutmaya tabi tutulmuştur. Parafini kullandıktan sonra, kurutma havasının sıcaklığının, güneş battıktan sonra en az beş saat boyunca ortam sıcaklığından 2,5 ile 7,5°C arasında daha yüksek olduğu bulunmuştur. Buna ek olarak, güneş enerjili kurutucu sırasıyla parafin ile ve olmadan çalıştırıldığında 0,1204 ve 0,0894  $\text{kg/s'lik}$  kütle akış hızları sağlamıştır. Faz değiştirme materyali olarak parafin kullanılan kurutucunun, istenen sıcaklığı her gün art arda yedi saat boyunca koruduğu tespit edilmiştir. Bunun, sırasıyla 12 ve 18 saat sonra fesleğen ve zakkum bitkilerinin nihai nem içeriğine ulaşmasına yardımcı olduğu bildirilmiştir (Shalaby ve Bek, 2014).

#### Kimyasal Enerji Deposuna Sahip Güneş Enerjisi Destekli Kurutucular

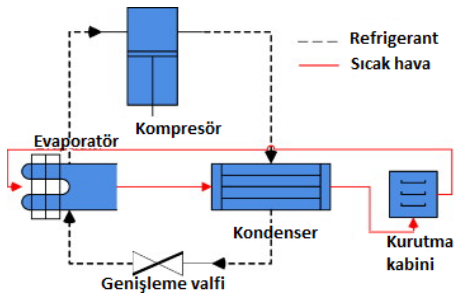
**Isı pompası:** Kimyasal enerji depolayan sistemlerin en önemlisi ısı pompalarıdır. Isı pompası sıcaklığı düşük olduğu için kullanılmayan enerjinin ısıtılması ile kullanılabilir hale getirildiği cihazlardır. Soğutma makineleri, klimalar ve nem gidericiler ısı pompalarının örnekleridir. Isı pompaları uzun yıllardır endüstride yoğun bir şekilde kullanılmasına rağmen bunların kurutma cihazları ile birlikte kullanılmasını nispeten yeni bir uygulamadır. Isı pompalı kurutucularda, kurutucuyu terk eden nemli havanın enerjisi tekrar ısı pompasında kullanılarak enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Isı pompaları dört ana parçadan oluşmaktadır. Bunlar, evaporatör, kondenser, genişleme valfi ve kompresördür (Atalay, 2010). Basit bir ısı pompası destekli kurutucu Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 8 Farklı depo materyallerinin sıcaklığa bağlı olarak depoladıkları enerji (Kaygusuz 1995)  
Figure 8 Energy stored by different storage materials depending on temperature



Şekil 9 Faz değıştiren materyal içeren enerji deposuna sahip bir güneş enerjisi destekli kurutucu  
Figure 9 A solar assisted dryer with energy storage containing phase changing material



Şekil 10 Isı pompası destekli kurutucu (Daghigh ve ark., 2010)  
Figure 10 Heat pump assisted dryer

Bu tip kurutucularda nemli hava ısı pompasının evaporatöründen geçerek enerjisini soğutkana (refrijerant) aktarmaktadır. Böylece soğuyan havada bulunan nem yoğunlaşarak ayrılmaktadır. Daha sonra kondenserden geçen soğuk hava soğuktan enerji olarak ısınmakta ve böylece tekrar tekrar kullanılabilir. (Atalay, 2010). Bu şekilde, hava sıcaklık ve bağıl nemi tam olarak kontrol edilmekte, enerji ekonomisi sağlanmakta ve standart kalitede ürün elde edilmektedir. Ancak bu tip sistemlerin yatırım maliyeti oldukça yüksek olup düzenli bakım gerekmektedir (Daghigh ve ark., 2010).

**Kimyasal ısı pompası:** Isı pompalarının çalışması için mekanik enerji gerekmektedir. Kimyasal ısı pompalarında ise mekanik enerji kullanımını önlemek amacıyla çeşitli kimyasal reaksiyonlardan yararlanılmaktadır. Bu amaçla belirli şartlar altında endotermik ve ekzotermik reaksiyon veren çözeltiler kullanılmaktadır (Ogura ve Mujumdar, 2000).

### Solar Kurutucuların Seçimi

Farklı tarımsal ürünlerin kurutma özellikleri değişiklik göstermektedir. Bununla beraber güneş enerjisi potansiyeli de mevsime, zamana ve konuma göre değişmektedir. Bu sebepten dolayı değişik türlerde miktarları, güneş ışınımı alma biçimleri vb. özellikleri birbirinden farklı olabilmektedir. Bu nedenle kurutucu tasarımında kurutulacak ürün miktarı, başlangıç nem miktarı, denge nemi, ön işlem gereksinimi, ürünün fizikomekanik özellikleri, kurutma sonunda istenilen ürün özellikleri (son nem miktarı, renk tekrar alma özellikleri, tat, besin değerleri vb.), bölgenin iklim şartları ve coğrafik özellikleri gibi bilgilere gereksinim duyulmaktadır (Tarhan ve ark., 2007).

### Sonuç

Bu derlemede kurutma yöntemleri, güneş enerjisi destekli kurutma sistemleri ve enerji deposu içeren güneş enerjisi destekli kurutma sistemleri derlenmiştir. Güneş enerjisi destekli kurutucular düşük maliyetle uygun kalitede gıda eldesini sağlamaktadır. Açık havada kurutmaya oranla daha kısa kuruma süresi, kontaminasyon riskinin düşüklüğü ve daha yüksek kalite gibi birçok açıdan avantajları bulunmaktadır. Ayrıca, bazı sistemlerde kurutma parametrelerinin kontrol edilebilmesi mümkün olmaktadır. Bozulmayı azaltmak, ürün kalitesini ve genel işleme hijyenini iyileştirmek için kırsal alanlarda kolaylıkla kullanılabilir. Kısaca, güneş enerjisi ile kurutma, sebze ve meyveleri temiz, hijyenik ve sağlıklı koşullarda ulusal ve uluslararası standartlara uygun, sıfır enerji (ya da oldukça düşük enerji ile) maliyetiyle işleyebilecek bir alternatif sunmaktadır. Enerji ve zaman tasarrufu, daha az alan kaplama ve ürün kalitesini geliştirme kurutma sürecini daha verimli hale getirilmekte ve çevrenin korunmasını sağlamaktadır. Ülkemiz güneş enerjisi potansiyeli dikkate alındığında güneş enerjisi destekli kurutma yöntemlerinin yaygınlaşması ve daha etkin kurutma yapan cihazların geliştirilmesine yönelik çalışmaların hız kazanması gerektiği düşünülmektedir.

### Kaynaklar

Agrawal A, Sarviya R. 2016. A review of research and development work on solar dryers with heat storage. International Journal of Sustainable Energy, 35 (6): 583-605.

- Anonim. 2006. <http://www1.gantep.edu.tr/dalgic/gunes.htm>. In).
- Atalay Ö. 2010. Güneş enerjisi destekli nem almalı ısı pompalı kurutucunun tasarımı ve termodinamik analizi. Unpublished Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Aumporn O, Zeghmati B, Chesneau X, Janjai S. 2018. Numerical study of a solar greenhouse dryer with a phase-change material as an energy storage medium. *Heat Transfer Research*, 49 (6).
- Ayyappan S, Mayilsamy K, Sreenarayanan V. 2016. Performance improvement studies in a solar greenhouse drier using sensible heat storage materials. *Heat and Mass Transfer*, 52 (3): 459-467.
- Bayhan HA. 2011. Kabin tipi bir kurutucuda kurutma sürecini etkileyen parametrelerin deneysel olarak incelenmesi. Unpublished Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Bingöl G, Devres O. 2011. Gıda işlemede kurutma teknolojilerinin temel ilkeleri: İstanbul Sanayi Odası.
- Bolaji BO, Olalusi AP. 2008. Performance evaluation of a mixed-mode solar dryer.
- Cemeroğlu B. 2009. Meyve ve sebze işleme teknolojisi Ankara.
- Chen H-H, Hernandez CE, Huang T-C. 2005. A study of the drying effect on lemon slices using a closed-type solar dryer. *Solar Energy*, 78 (1): 97-103.
- Coşkun F. 2014. Valsli kurutucuda elma tozu eldesi. Unpublished Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir.
- Daghigh R, Ruslan MH, Sulaiman MY, Sopian K. 2010. Review of solar assisted heat pump drying systems for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (9): 2564-2579.
- Devahastin S, Pitaksuriyarat S. 2006. Use of latent heat storage to conserve energy during drying and its effect on drying kinetics of a food product. *Applied thermal engineering*, 26 (14-15): 1705-1713.
- Doymaz I. 2004. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of food engineering*, 61 (3): 359-364.
- Eke BA. 2013. Development of small scale direct mode natural convection solar dryer for tomato, okra and carrot. *International Journal of Engineering and Technology*, 3 (2): 199-204.
- Ekechukwu OV, Norton B. 1999. Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Energy conversion and management*, 40 (6): 615-655.
- El-Beltagy A, Gamea G, Essa AA. 2007. Solar drying characteristics of strawberry. *Journal of food engineering*, 78 (2): 456-464.
- El-Sebaï A, Shalaby S. 2013. Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint. *Energy Conversion and Management*, 74: 109-116.
- El-Sebaï A, Shalaby S. 2017. Experimental Investigation of Drying Thymus Cut Leaves in Indirect Solar Dryer With Phase Change Material. *Journal of Solar Energy Engineering*, 139 (6): 061011.
- ELkhadraoui A, Kooli S, Hamdi I, Farhat A. 2015. Experimental investigation and economic evaluation of a new mixed-mode solar greenhouse dryer for drying of red pepper and grape. *Renewable Energy*, 77: 1-8.
- Esper A, Mühlbauer W. 1998. Solar drying-an effective means of food preservation. *Renewable Energy*, 15 (1-4): 95-100.
- Evranuz EÖ. 1998. Gıda Mühendisliği Tasarımı Ders Notları. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Gallali YM, Abujnah YS, Bannani FK. 2000. Preservation of fruits and vegetables using solar drier: a comparative study of natural and solar drying, III; chemical analysis and sensory evaluation data of the dried samples (grapes, figs, tomatoes and onions). *Renewable Energy*, 19 (1-2): 203-212.
- Ghazanfari A, Tabil Jr L, Sokhansanj S. 2003. Evaluating a solar dryer for in-shell drying of split pistachio nuts. *Drying Technology*, 21 (7): 1357-1368.
- Guzmán-Valdivia CH, Carrera-Escobedo JL, García-Ruiz MA, Ortíz-Rivera A, Désiga-Orenday O. 2016. Design, development and control of a portable laboratory for the chili drying process study. *Mechatronics*, 39: 160-173.
- Gürlek G, Özbalta N, Güngör A. 2009. Solar tunnel drying characteristics and mathematical modelling of tomato. *Journal of Thermal Science and Technology*, 29 (1): 15-23.
- Hossain M, Bala B. 2007. Drying of hot chilli using solar tunnel drier. *Solar Energy*, 81 (1): 85-92.
- Jain D. 2007. Modeling the performance of the reversed absorber with packed bed thermal storage natural convection solar crop dryer. *Journal of food engineering*, 78 (2): 637-647.
- Kaewkiew J, Nabnean S, Janjai S. 2012. Experimental investigation of the performance of a large-scale greenhouse type solar dryer for drying chilli in Thailand. *Procedia Engineering*, 32: 433-439.
- Kamble A, Kalbande S, Deshmukh M, Gadge S. 2011. Solar drying system for energy conservation. *Applied Solar Energy*, 47 (2): 124.
- Kant K, Shukla A, Sharma A, Kumar A, Jain A. 2016. Thermal energy storage based solar drying systems: a review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 34: 86-99.
- Karaaslan S. 2012. Meyve ve sebzelerin mikrodalga destekli kurutma sistemleri ile kurutulması. Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 7 (2): 123-129.
- Karel M. 1991. Physical structure and quality of dehydrated foods. In 7 th International Drying Symposium in conjunction with the CSISA'90 Congress, Prague, Czech, 08/90, (pp. 26-35).
- Kaygusuz K. 1995. Experimental and theoretical investigation of latent heat storage for water based solar heating systems. *Energy conversion and management*, 36 (5): 315-323.
- Lingayat A, Chandramohan V, Raju V. 2017. Design, development and performance of indirect type solar dryer for banana drying. *Energy Procedia*, 109: 409-416.
- Mohanraj M, Chandrasekar P. 2009. Performance of a forced convection solar drier integrated with gravel as heat storage material for chili drying. *Journal of Engineering Science and Technology*, 4 (3): 305-314.
- Ogheneruona D, Yusuf MO. 2011. Design and fabrication of a direct natural convection solar dryer for tapioca. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 3: 95-104.
- Ogura H, Mujumdar AS. 2000. Proposal for a novel chemical heat pump dryer. *Drying Technology*, 18 (4-5): 1033-1053.
- Olgun H, Rzaev P. 2000. Fındığın üç farklı sistemde güneş enerjisi ile kurutulması. *Tr J Engin Environ Sci, Tübitak*, 24: 1-14.
- Rabha D, Muthukumar P, Somayaji C. 2017. Experimental investigation of thin layer drying kinetics of ghost chilli pepper (*Capsicum Chinense* Jacq.) dried in a forced convection solar tunnel dryer. *Renewable Energy*, 105: 583-589.
- Rajagopal T, Sivakumar S, Manivel R. 2014. Development of solar dryer incorporated with evacuated tube collector. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3 (3): 2655-2658.
- Ratti C. 2001. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. *Journal of food engineering*, 49 (4): 311-319.
- Salunkhe DK, Bolin HR, Reddy N. 1991. Storage, processing, and nutritional quality of fruits and vegetables. Volume I. Fresh fruits and vegetables: CRC press.
- Selçuk MK, Ersay Ö, Akyurt M. 1974. Development, theoretical analysis and performance evaluation of shelf type solar driers. *Solar Energy*, 16 (2): 81-88.
- Shalaby S, Bek M. 2014. Experimental investigation of a novel indirect solar dryer implementing PCM as energy storage medium. *Energy conversion and management*, 83: 1-8.
- Shanmugam V, Natarajan E. 2007. Experimental study of regenerative desiccant integrated solar dryer with and without reflective mirror. *Applied Thermal Engineering*, 27 (8): 1543-1551.

- Sharma A, Tyagi VV, Chen C, Buddhi D. 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 13 (2): 318-345.
- Song M, Songlin Y, Biguang Z, Dong Z. 2011. Experimental Research of Grape Drying Using Solar Dryer with Latent Heat Storage System. In *Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM)*, 2011 International Conference on, (pp. 740-742): IEEE.
- Tang J, Yang T. 2004. *Dehydrated vegetables: principles and systems*: Marcel Dekker: New York.
- Tarhan S, Ergüneş G, Tekelioğlu O. 2007. Tarımsal ürünler için güneş enerjili kurutucuların tasarım ve işletme esasları. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 99: 26-32.
- Tefera A, Endalew W, Fikiru B. 2013. Evaluation and demonstration of direct solar potato dryer.
- Telis V, Sobral P. 2002. Glass transitions for freeze-dried and air-dried tomato. *Food Research International*, 35 (5): 435-443.
- Toğrul İT, Pehlivan D. 2002. Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*, 55 (3): 209-216.
- Tontul I, Topuz A. 2017. Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties. *Trends in Food Science & Technology*, 63: 91-102.
- Us F. 2006. Ozmotik kurutma. *Türkiye 9. Gıda Kongresi*: 24-26.
- Vijayan S, Arjunan T, Kumar A. 2016. Mathematical modeling and performance analysis of thin layer drying of bitter melon in sensible storage based indirect solar dryer. *Innovative food science & emerging technologies*, 36: 59-67.
- Visavale G. 2012. Principles, classification and selection of solar dryers. *Solar drying: Fundamentals, Applications and Innovations*, Ed. Hii, CL, Ong, SP, Jangam, SV and Mujumdar, AS, Published in Singapore: 1-50.
- Yağcıoğlu A. 1999. *Tarım Ürünleri Kurutma Tekniği (I. Basım)*, Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, No. 536, 348 s. In): Bornova-İzmir.
- Yaşartekin Y. 1991. Kabinet tipi, güneşi dikey ekseninde belirli aralıklarla İzleyen, güneş enerjili kurutucunun tasarımı ve tarımsal ürünlerin kurutulmasında denenmesi. Unpublished Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir.
- Yılmaz HN. 2000. Güneş pili tahrikli model bir güneşli kurutucunun geliştirilmesi ve kurutulmuş domates üretiminde teorik ve deneysel İncelenmesi. Unpublished Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir.
- Yokuş B. 2014. Farklı ön işlemlerin ve uygulanan farklı kurutma yöntemlerinin elmada toplam fenol miktarı ve antioksidan aktivite üzerine etkileri. Unpublished Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik.