

Kurutma Sistemleri, Enerji Tüketimleri ve Ürün Kalitesine Etkileri ve Örnek Sistem Tasarımı

Tuğba KOVACI¹, Erkan DİKMEN¹, Arzu ŞENCAN ŞAHİN*¹

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Bölümü, Isparta

(Alınış / Received: 08.06.2018, Kabul / Accepted: 22.06.2018)

Anahtar Kelimeler

Kurutma teknolojileri,
Enerji tüketimi,
Ürün kalitesi,
Dondurarak kurutma

Özet: Ürünlerin su ve mikrobiyal aktivitesini azaltıp hacmini küçülterek uzun süreli depolama, nakliye gibi işlemleri gerçekleştirmek için en yaygın kullanılan yöntemlerin başında kurutma gelmektedir. Kurutma işlemi boyunca sürekli değişen koşullar, kurutma süresi, enerji tüketimi ve ürün kalitesi gibi kurutma işlemini gerçekleştirmek için en uygun çalışma koşullarını belirlemeyi zorlaştırmaktadır. Yüksek enerji tüketimi ve her ürün için farklı kurutma sonuçlarının olması nedeniyle, araştırmacılar farklı ürünlerde farklı kurutma teknolojilerini ve bunların kombinasyonlarını kullanmışlardır. Bu derleme son yıllarda farklı kurutma teknolojileriyle yapılan ürün kurutulması ve deney sonuçlarındaki gelişmeler, enerji tüketimleri ve kurutma sonrası üründeki değişiklikler üzerine bir araştırmadır. Çalışmada ek olarak ısı pompalı dondurarak kurutucu tasarımı örnek çalışma olarak verilmiştir. Yaygın olarak kullanılan mevcut teknolojiler ve bu teknolojilerin mevcut sınırlamaları ve kurutma işlemi sonrası ürün kalitesi üzerine yapılan çalışmaların daha fazla araştırılması ve geliştirilmesi gerekmektedir.

Drying Systems, Energy Consumption and Product Quality and Sample System Design

Keywords

Drying technologies,
Energy consumption,
Product quality,
Freeze drying

Abstract: Drying is one of the most commonly used methods for carrying out processes such as long-term storage, transportation, etc., by reducing the water and microbial activity of the products and reducing the volume. The constantly changing conditions throughout the drying process make it difficult to determine the most suitable operating conditions to perform the drying process, such as drying time, energy consumption and product quality. Because of the high energy consumption and the different drying results for each product, the researchers used different drying technologies and their combinations in different products. This review is a survey of recent developments in product drying and test results made with different drying technologies, energy consumption and post-drying changes in the product. In addition to the study, a heat pump freeze dryer design is given as a case study. Further exploration and development of existing technologies that are widely used and the current limitations of these technologies and work on product quality after drying are required.

1. Giriş

Nispeten yüksek nem içeriğinden dolayı, taze meyve sebzeler mikrobiyal bozulmaya ve zararlı enzim reaksiyonlarına duyarlı oldukları için kısa raf ömrüne sahiptir. Kurutma, mikroorganizmaların çoğalmasını engelleyebildiğinden ve raf ömrünü arttırmak için

birçok nem aracılı bozunma reaksiyonunu en aza indirebildiğinden, taze meyve ve sebzelerin kalitesinin ve stabilitesinin korunması için uygun ve iyi bilinen bir hasat sonrası teknolojisidir(Saavedra vd., 2017, Wang vd., 2017). Ayrıca, kurutma ile ürünlerin su aktivitesini ve mikrobiyal aktivitesini, hacim ağırlığını azaltarak paketleme, depolama ve nakliye

maliyetlerini ve depolama sırasında üründeki fiziksel ve kimyasal değişiklikleri en aza indirmek mümkündür (Sonmete vd., 2016, Thirugnanasambandham ve Sivakumar, 2016, Nguyen vd., 2018).

Kurutulmuş meyve ve sebzeler aynı zamanda besin bileşenleri kaybına maruz kalır ve kurutma işlemi boyunca sürekli değişen koşullar, işlemin zaman süresini ve kurutma işlemi gerçekleştirilmek için en uygun çalışma değerlerini belirlemeyi zorlaştırır (Saavedra vd., 2017). Zaman verimliliği, düşük enerji tüketimi ve yüksek ürün kalitesi, kurutma endüstrisinden yararlanılabilecek üç ana faktördür. Yeni teknolojilerin geliştirilmesiyle, günümüzde sıcaklık, ağırlık, güç, koku vb. gibi kurutma işlemleri sırasında daha fazla parametre izlenebilmekte ve kontrol edilebilmektedir (Pu vd., 2016).

Araştırmacılar, farklı tarım ürünleri için kurutma süresi, enerji tüketimi ve ürün kalitesi açısından en uygun yöntemi belirlemek için farklı kurutma yöntemleri veya bunların kombinasyonlarını kullanmışlardır. Aktaş vd. (2017) ısı pompalı kurutucunun ve kızıl ötesi destekli ısı pompalı kurutucunun enerji ve ekserji verimliliğini karşılaştırılmışlar ve rendelenmiş havucun kurutma kinetikleri analizinin etkinliğini gözlemlemişlerdir. Wang vd. (2010), çalışmalarında mikrodalgalı dondurarak kurutma ile kuruma hızının, geleneksel vakumlu dondurarak kurutma yönteminden yaklaşık %37 daha kısa olduğu tespit edilmiştir. Her iki kurutma yönteminde de benzer kalitede patates dilimleri elde edilmiştir. Zielinska vd. (2013), çalışmalarında çok aşamalı akışkan yataklı atmosferik dondurarak kurutma ve mikrodalga vakum kurutma ile kurutulan bezelyenin kurutma kinetiği, nem içeriği, içyapısı ve fiziksel parametrelerini incelemişlerdir. Mikrodalga ısıtmanın uygulanması ile kurutma süresinin oldukça kısaldığı ve bu şekilde kurutulan ürünlerin içyapılarında çok küçük değişiklikler meydana geldiği belirlenmiştir.

2. Kurutma Sistemlerinin Kısa Bir Karşılaştırılması

Doğal güneşte kurutma yöntemi, basitlik, düşük sermaye ve işletme maliyetleri avantajlarına sahiptir, ancak ürün kalitesinde olumsuz sonuçlara yol açabilir. Geleneksel kurutma yöntemi, uzun işleme sürelerinin yanında meteorolojik koşullar ve küf veya böcek kirlilikleri gibi çeşitli kısıtlamalardan da büyük ölçüde etkilenir. Gelişmekte olan ülkelerde kurutucuların piyasaya sürülmesi, geleneksel kurutma yöntemlerine kıyasla, ürün kayıplarını azaltmış ve kurutulmuş ürünün kalitesini önemli ölçüde arttırmıştır (Silva vd., 2016, Sonmete vd., 2016). Meyve ve sebzelerin kurutulmasında sıcak hava, mikrodalga, vakum, kızılötesi, dondurarak, güneş enerjili, ısı pompalı ve elektrohidrokinamik kurutma gibi farklı yöntemlerin kullanıldığı pek çok çalışma vardır.

Tek bir kurutma işleminde birkaç enerji kaynağının kombinasyonu, kurutma verimliliğinde önemli gelişmeler sağlanabilir. Gıda kalitesini iyileştirmek için yeni hibrit kurutma teknolojilerinin gelişimi, çevresel etkilerin azalmasıyla birlikte kalitenin iyileştirilmesi için de avantajlıdır (Chou ve Chua, 2001, Szadzinska vd., 2017). Örneğin konvektif kurutma, yüzey üzerinde ve yakınında serbest suyun giderilmesi için mikrodalga kurutma işleminden daha verimlidir, ancak yüzey sertleştirme etkisi, suyun içeriden daha fazla buharlaşmasını önleyebilmektedir. Bu iki yöntemin birçok çalışmadaki kombinasyonu, verimliliği, ekonomiyi ve bazı durumlarda iyi ürün kalitesini göstermektedir (Xu vd., 2018). Samadi vd. (2014), endüstriyel uygulamalarda geleneksel kurutuculara alternatif olarak geliştirdikleri BIG (birleşik ısı ve güç kurutma sistemi) kurutucusuyla farklı kalınlıklardaki muz dilimlerinin farklı kurutma yüklerindeki kurutma davranışlarını, sistemin enerji tüketimi ve verimini incelemişlerdir. Farklı kurutma yükleri ve ürün kalınlıklarında muz dilimleri ile çalışılan BIG ile yapılan kurutma, enerji etkinliğini %11-20 gibi önemli bir derecede arttırırken; spesifik enerji tüketimi ürün kalınlığının azalmasıyla azalma göstermiştir. Bai vd. (2012), çalışmalarında denizhiyarını elektrohidrokinamik kurutmayı (EHD) ve vakumlu dondurarak kurutmayı (FD) birleştirerek oluşturdukları bir sistemle kurutmuşlardır. EHF (EHD-FD birleşimi) ile kurutulan denizhiyarında, EHD ile kurutulan ürünle kıyaslandığında daha az büzüşme, daha iyi rehidrasyon kapasitesi ve daha yüksek protein içeriği belirlenmiştir. Deneyler sonucunda EHD-FD ile kurutma metodunun kurutma süresini kısalttığı ve daha az enerji tükettiği belirlenmiştir. Xu vd. (2006), çalışmalarında çilek meyvelerini vakumlu dondurarak kurutma (FD), taşınımlı hava kurutma (AD) ve FD ve AD'yi içeren iki aşamalı hibrit kurutma (FAD) yöntemleriyle kurutmuşlardır. FD ile kurutmada daha uzun kuruma süresi ve daha az bozulmaya uğramış ürün elde edilirken; enerji tüketimi, AD yönteminden daha yüksek bulunmuştur. FAD yöntemi ise enerji tüketimi açısından FD ve AD yöntemleri arasında yer almıştır.

Ürünlerdeki sağlıklı bileşiklerin kaybını en aza indirmek için doğru kurutma yönteminin seçilmesi çok önemlidir. Gıdaların dehidrasyonu için en yaygın teknik, kolay kurulabilmesi ve raf ömrünü uzatmanın ortak bir yolu olduğu için hava-kurutmadır (Kumoro vd., 2018). Bu yöntemin birçok faydası olmasına rağmen, kurutma yüksek enerji tüketimi ve dolayısıyla yüksek işletme maliyetleri ile sonuçlanmaktadır (Rodriguez vd., 2017). Sıcak hava ile kurutmanın ana dezavantajı, yüksek sıcaklıklarda bile uzun zaman alabilmesidir ve özellikle de düşme hızı periyodu süresince düşük enerji verimliliğine sahip olmasıdır. Bu da ürünün, lezzet, renk, doku, besin durumu gibi kalite özelliklerinde ciddi hasara neden olabilir (Talens vd., 2017). Bu yöntem ile kurutulmuş malzemelerde toz ve mikrobiyal kirlenme gibi bazı

problemler de ortaya çıkmaktadır (Torki-Harchegani vd., 2016, Zielinska ve Markowski, 2016). Konvektif kurutmanın bazı olumsuz özelliklerini en aza indirmek için önerilen yollardan biri, mikrodalga, dondurma, ultrason gibi farklı enerji kaynaklarının kombinasyonu ile sağlanan hibrit kurutma yöntemlerin uygulanmasıdır (Tao vd., 2016, Jiang vd., 2017). Lenaerts vd. (2018) çalışmalarında gıdaların mikrodalgada kurutulması, geleneksel sıcak hava ile kurutma işlemine kıyasla daha iyi aroma, besin değeri, renk ve daha hızlı ve geliştirilmiş bir rehidrasyon ile yüksek kaliteli ürünler elde edilmesini sağladığını belirtmişlerdir. Orikasa vd. (2014), çalışmalarında sıcak hava ve vakumlu kurutma yöntemleriyle kivi dilimlerinin nem içeriği, renk değişimi, antioksidan aktivitesi gibi özelliklerindeki değişimlerini incelemişlerdir. Kivi örneklerinde, L-absorbikası ile önlemede vakumlu kurutmanın sıcak hava ile kurutma yöntemine göre daha uygun olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca diğer kalite parametrelerinin (sertlik, toplam renk değişimi ve antioksidan aktivitesi) değişimi önemsiz bulunmuştur.

Geleneksel ısıtmaya göre biyolojik malzemenin kuruma sürelerini, küçük kalite kayıplarıyla azaltmak gibi avantajları nedeniyle popülerlik kazanan mikrodalga ile kurutma, yakın geçmişte büyük ilgi gören kurutma teknolojilerinden biridir (Talens vd., 2017). Mikrodalga kurutma, sadece konvektif kurutmada olduğu gibi yüzeyi değil tüm malzemeyi hacimsel olarak ısıtmak için elektromanyetik dalgalara dayanan bir tekniktir. Ürünün çevresi ve iç kısmı arasındaki su buharı basıncındaki fark, nemi gıdadan uzaklaştırmak için itici güç olarak kullanılır (Lenaerts vd., 2018). Mikrodalga kurutmada ısı aktarma yönü, geleneksel termal kurutmada, ısının dış termal ortamdan kurutulacak ürüne aktarıldığı yerin tersidir (Jiang vd., 2017). Gıda maddelerinin mikrodalgada kurutulmasında, çekirdek sıcaklığı genellikle yüzey sıcaklığından daha yüksektir (Xu vd., 2018). Malzemenin içindeki sıcaklık artışı, malzemenin yüzeyine doğru nemin 'pompalamasına' neden olan termo-difüzyon ve basınç gradyanını içerir. (Szadzinska vd., 2017).

Uygun koşullar altında mikrodalga destekli kurutma işleminin, kuruma süresi önemli ölçüde azalttığı ve renk ve doku gibi ürün kalitesini geliştirdiği kanıtlanmıştır (Cuccurullo vd., 2018) ve bu teknoloji genellikle kurutma öncesi ön işlem olarak kullanılmaktadır (Krokida ve Maroulis, 2000). Monteiro vd. (2015) çalışmalarında mikrodalga ile kurutmada meyve ve sebzelerin kuruma karakteristiklerinin dondurarak kurutmaya benzerlik gösterdiğini ve ürünlerin kuruma sürelerinin azaldığını tespit etmişlerdir. Tian vd. (2016) çalışmalarında sıcak hava, vakum, mikrodalga ve vakumlu mikrodalga kurutma teknikleri uyguladığı Şitaki mantarlarında en kaliteli kurutulmuş ürünü vakumlu mikrodalga yönteminde elde etmişlerdir. Vakumlu mikrodalga kurutma, renk özellikleri ve

besin tutumu açısından iyi sonuçlar vermiş ve ayrıca, bu şekilde kurutulmuş örneklerde daha az çökmüş bir yapısı gözlenmiştir. Lv vd. (2018) çalışmalarında yuvarlak bambu nem içeriğini % 10 oranında azaltmak için yaklaşık 150 dakika 80°C'de vakum altında mikrodalga kurutma uygulamışlardır. Elde edilen kuru bambular düzgün bir yüzeye, üstün parlaklığa, tekdüze altın rengine sahiptir ve birkaç çarpıcı kusura sahip olmakla birlikte iyi mekanik performans göstermişlerdir. Benzer koşullarda, geleneksel kurutma yöntemleriyle fırında bambu kurutmak için yaklaşık 900 dakika gerekmektedir. Vakumlu mikrodalga kurutma ve geleneksel kurutma yöntemleri tarafından bambu kurutma için enerji tüketimi, 1 ton yuvarlak bambu başına sırasıyla yaklaşık 288 kW ve 565 kW olarak belirtilmiştir. Cuccurullo vd. (2018) çalışmalarında mikrodalga destekli bir kurutmada dilimlenmiş elma dilimleri kurularak, mikrodalga kurutma işlemiyle yer alan üç ana değişkenle (sıcaklık seviyesi, kurutma hızı ve nem oranı) ilgili temel bir harita geliştirilmişlerdir. Kurutma işlemi 70 ve 80°C sabit sıcaklıkta daha iyi ürün kalitesi sağlanmıştır.

Sevkiyat ve depolama için talep edilen ürün stabilitesini sağlamak için yaygın bir biyolojik kökenli tıbbi madde üretim yöntemlerinden biri de dondurarak kurutmadır (Peters vd., 2016). Dondurarak kurutma, üründeki ısı hasarını önleyip, mükemmel yapısal tutma özelliklerine sahip ürünler elde edilmesini sağlayan, ürün büzülmesinin ortadan kaldırıldığı veya en aza indirildiği ve neredeyse mükemmel bir koruma sonucunun beklendiği yöntemlerin başında gelir (Aktas vd., 2007). Dondurarak kurutma yöntemi, daha çok sıradan kurutma yöntemleriyle uygun şekilde üretilmeyecek, avantajlı kalite özellikleri olan gözenekli yapılarda kurutulmuş ürünler sağlar (Sadıkoğlu ve Özdemir, 2003). Bu kurutma yönteminin temel parametresi, uygulanan basınçtır. Sistem basıncı çok düşük tutulduğunda kaynama noktası 0 ° C'nin altında olduğunda, materyaldeki su donmuş kalır ve kuru katılardan uzaklaşır (Krokida ve Maroulis, 2000). Ancak dondurarak kurutma diğer yöntemlere göre çok enerji tüketen maliyetli bir süreç olduğundan genellikle yüksek değerli ürünler için uygundur (Pei vd., 2016).

Hassas yapıları ürünler başta olmak üzere özellikle ürün kalitesinin ve minimum besin kaybının ön planda olduğu ürünlerde dondurarak kurutma ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Liliana vd. (2015), dondurarak kurutmada çoğu meyvede rengin aynı kaldığı ve dondurulmuş meyvelerin porozitelerinin dondurulma hızına bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Çalışmada dondurarak kurutmanın ürünlerin rehidrasyon kapasitesini arttırdığı gözlemlenirken, ürünlerde yapısal çökmeler de gözlemlenmiştir. Reyes vd. (2011), çalışmalarında Fuji elmalarının atmosferik dondurarak kurutma ve vakumlu dondurarak kurutma ile kurutulmasında, her iki kurutma

yönteminde de ürün boyutunun ve IR uygulamasının kuruma süresini etkilediği gözlenmiştir. Lin vd. (2012) çalışmalarında dondurarak kurutma yöntemi uygulanan örnekler başlangıçtaki kalitelerini korurken; güneşte kurutma ve hava ile kurutma yöntemlerinin fenolik madde içeriğinde büyük kayıplara neden olduğunu gözlemlemiştir. Huang vd. (2011), çalışmalarında patates ve elma cipsleri karışımını mikrodalga ile dondurarak kurutma (MFD), dondurarak kurutma (FD), mikrodalga vakum kurutma ve vakum kurutma gibi farklı kurutma yöntemleriyle kurutmuşlardır. MFD yöntemiyle kurutulan ürünlerde kuruma süresinin FD yöntemine göre çok daha kısa olduğu ve kurutulan cipslerinin yapı ve kalite olarak daha iyi olduğu belirtilmiştir. Wojdylo vd. (2016), farklı kurutma yöntemlerini ve kombinasyonlarını karşılaştırdıkları çalışmalarında, hünnap meyvelerini en iyi kurutma yönteminin dondurarak kurutma, ikinci en iyi kurutma işleminin vakum-mikrodalga kurutma, en kötü kurutma işlemi ise 70°C'de konvektif kurutma olduğunu belirtmişlerdir.

Bir hava sirkülasyon sistemi ve bir iklimlendirme soğutma sisteminin bileşenleri olan geleneksel bir kurutma odasından oluşan ısı pompalı kurutucular yaygın olarak kullanılan kurutma teknolojilerinden biridir. Hava, evaporatör tarafından nemden arındırılır ve ısı pompası kondansatörü tarafından tekrar ısıtılır (Chapchaimoh vd., 2016). ısı pompalı kurutma, atmosfere kirli ve toksik gazlar yada su buharı vermediği için çevre dostu bir kurutma yöntemidir (Minea, 2015). Ayrıca ısı pompası destekli kurutma yöntemi, gizli ısı kazanımı sağladığı için yüksek enerji etkinliğine sahiptir. Genellikle, ısı pompalı kurutucular 30-60°C sıcaklık aralığında çalışmaktadır, örneğin, zencefil 50°C'de (Chapchaimoh vd., 2016), maydanoz 36-46°C 'de (Dikmen vd., 2018), meyve 30-60° C'de (Prasertsan ve Saen-saby, 1998, Pal vd., 2008) kurutulmuştur. Söylemez (2006) çalışmasında kurutma uygulamalarında kullanılan ısı pompasının optimum çalışma koşullarını tahmin etmek için basit cebirsel formül veren bir termo ekonomik optimizasyon analizi sunmuştur. Aktaş vd. (2017) çalışmalarında kızıl ötesi destekli ısı pompalı kurutmadaki ekserji verimliliğinin (%58-65), ısı pompalı kurutma sisteminden (%48-50) daha yüksek olarak belirlemiştir. Şevik vd. (2013), çalışmalarında güneş enerjisi destekli ısı pompalı sistemin ısı performans değerlerinin su kaynaklı ısı pompası sistemine göre daha yüksek olduğunu belirlemiştir. Ayrıca güneş enerjisi destekli ısı pompalı sistemle ürün kurutulması, doğal kurutmaya göre daha hızlı gerçekleşmiş ve kurutulan mantarlarda renk ve tat özelliklerinde herhangi bir bozulma görülmemiştir.

Ultrason teknolojisi, geleneksel kurutma işlemi geliştiren, ozmotik dehidrasyon gibi diğer kütle

transfer süreçlerini iyileştirmek için kullanılan yenilikçi bir tekniktir (Ricce vd., 2016). Gıdaların dondurulması da dahil olmak üzere, gıdaların işlenmesi ve korunması için ultrasonun kullanımı sürekli olarak artmaktadır (Islam vd., 2014). Ultrason uygulamasının sağladığı mekanik enerji, kütle transferinde hem iç hem de dış dirençlerin azaltılmasına katkıda bulunur, çünkü su transferi esas olarak genişleme ve sıkıştırma döngülerini değiştirerek gerçekleşir (Çakmak vd., 2016). Yüksek güçlü ultrason, akustik kaviteasyon oluşturur ve malzeme yüzey tabakasında 'ısıtma etkisi' ve mikro-'titreşim etkisi' olarak adlandırılan akustik enerjinin emilimini sağlar. Bu nedenle, ultrason işlemi biyomateryallerin fiziksel, mekanik veya kimyasal / biyokimyasal özelliklerini değiştirmektedir (Szadzinska vd., 2017).

Yayınlanmış çalışmalar ultrason ön işleminin sonraki kurutma işleminin iyileştirilmesi ve kurutma süresinin azaltılmasında etkili olduğu ispatlamıştır. Atmosferik dondurarak kurutmada kullanılan düşük çalışma sıcaklıkları, kalite özelliklerinde herhangi bir bozulma olmaksızın, ısıya duyarlı ürünlerin etkili bir şekilde kurutulmasına izin verir. Buna ek olarak ultrasonu gücü kullanıldığında, kurutma hızı artırılabilir, böylece işlem süresi kısalmıştır. Bununla birlikte, ultrason aynı zamanda ürün kalitesini de etkileyebilir (Colucci vd., 2018). Cao vd. (2017), ultrasonik dondurarak kurutmanın arpa çimenlerinin kalitesini, lezzetini ve enerji tüketimini iyileştirmek için bir alternatif olacağını belirtmiştir. Carrión vd. (2018) vakumlu dondurularak kurutmaya alternatif olarak atmosferik dondurarak kurutmayı iyileştirmek için ultrason gücünü kullanarak mantar kuruttuğu çalışmalarında, ultrason uygulamasının kurutma kinetiğini önemli ölçüde etkilediğini ve kurutma süresini % 74'e kadar kısalttığını belirtmişler ve renk, doku, rehidrasyon ve hücre hasarı gibi kalite parametrelerinde dikkate değer bir etki gözlemlememişlerdir. Xin vd. (2014) brokolinin ultrason destekli dondurarak kurutulduğu çalışmasında, bu yöntemin brokoli dokusunun mikroyapısı ve sertliğini daha iyi koruduğunu belirterek, gıdaların dondurulmasında ultrason destekli dondurarak kurutmanın büyük bir potansiyele sahip olduğunu belirtmişlerdir. Tao vd. (2016) ultrason ön işlemi uygulayarak sıcak hava ile kurutma işleminde, ultrason ön işleminin sadece dut yapraklarının ağırlığını etkilemediğini, aynı zamanda konvektif kurutma kinetiklerini ve toplam enerji tüketimini de azalttığını ortaya koymuştur.

Son yıllarda, farklı kurutma yöntemleri ile meyve ve sebzeler için yapılan çalışmaların bazıları Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Farklı yöntemlerle yapılan kurutma çalışmaları literatür özeti

Ürün		Kurutma yöntemi	Kurutma koşulları	İncelenen fiziko kimyasal özellikler	Bulgular	Ref	
Kabak	dilim	Mikrodalga multi-flash	Mikrodalga güçleri: 7 dakika için 1000 W, 10 dakika için 300 W ve 60 dakika için 200 W, 3-5 kPa vakum basıncı	Kurutma kinetiği, ürün yapıları, rehidrasyon kinetiği ve rehidrasyon indeksleri	Mikrodalga vakum ve multi-flash kurutma, kabak dilimlerinin çok kısa sürelerde kurutulması için uygun yöntemlerdir	Monteiro vd. (2018)	
		Mikrodalga vakum					
		İletken multiflash					3 - 5 kPa vakum basıncı
		Dondurarak					-60±1°C dondurma ısısı, 0.002±0.005 kPa vakum basıncı
		Sıcak hava					60°C sıcaklık, %22 bağıl nem, 0.6 m/s kurutma hızı
Kivi	dilim	Sıcak hava	50, 60, and 70°C sıcaklık	Nem içeriği değişimi, sertlik, L-askorbik asit içeriği, antioksidan aktivitesi, yüzey rengi	L-absorbik asitin önlenmesinde vakumlu kurutma daha uygundur	Orikasa vd. (2014)	
		Vakumlu	3 kPa vakum basıncı				
Bezelye	tane	Birleştirilmiş ısı pompalı akışkan yataklı atmosferik dondurarak (HPFBADF)	-20°C dondurma sıcaklığı	Kurutma kinetiği, nem içeriği, iç yapısı ve fiziksel parametreleri (yığın hacim ağırlığı, yoğunluk, yığın porozite, büzüşme, iç porozite, mikroyapı, sıkıştırma gücü, şekil, boyut, renk)	Mikrodalga vakum kurutma ile ürünlerin iç yapılarında çok küçük değişiklikler meydana gelmiş ve kurutma süresi oldukça kısalmıştır. Çok aşamalı kombine HPFBADF ve MVD ile yüksek ürün kalitesi elde edilmiştir	Zielinska vd. (2013)	
		mikrodalga vakum (MVD)	100 (50)W mikrodalga gücü, 3 kPa vakum basıncı				
		Sıcak hava	60°C sıcaklık				
Portakal kabuğu	dilim	Sıcak hava	7 m/s hava hızı, 55°C hava sıcaklığı	Toplam renk değişimi, reolojik özellikler, su tutma ve şişme kapasitesi	Sıcak hava ve mikrodalga kurutma ile kuruma süreleri kısalmıştır	Talens vd. (2017)	
		Sıcak hava ve mikrodalga	2, 4 ve 6 W/g mikrodalga gücü				
Yeşil biber	dilim	Sıcak hava	2 m/s hava akış hızı, 54°C ortalama hava sıcaklığı	Toplam renk değişimi, C vitamini muhafazası, su aktivitesi	Hibrit kurutma, kuruma süresini önemli ölçüde kısaltmış, enerji tüketimini azaltılmış ve kalite faktörlerini olumlu yönde etkilemiştir	Szadzinska vd. (2017)	
		Mikrodalga	100 W mikrodalga gücü				
		Ultrason	100 ve 200 W ultrason gücü				
Elma ve patates	cips	Mikrodalga dondurarak	4W/g mikrodalga gücü	Doku, renk, rehidrasyon, duyuşsal, mikroyapısal ve diğer kalite parametreleri	Mikrodalga dondurarak kurutma, kurutma süresi ve kaliteli ürün elde edilmesinde daha başarılı olmuştur.	Huang vd. (2011)	
		Dondurarak	50°C and -40°C, ısıtma ve soğutma sıcaklıkları, 100 Pa mutlak basınç				
		Mikrodalga vakum	100 Pa mutlak basınç, -40°C soğutma sıcaklığı, 1.6 W/g mikrodalga gücü, 50°C materyal yüzey sıcaklığı				

		Vakum	5 kPa, 50oC ısıtma sıcaklığı			
patates	dilim	Geleneksel vakumlu dondurarak kurutulma	-40oC soğutma sıcaklığı	C vitamini, şeker ve nişasta içeriği, renk ve yapı değişiklikleri	Mikrodalgalı dondurarak kurutma ile yaklaşık %37 daha kısa kuruma süresi elde edilmiştir	Wang vd. (2010)
		Mikrodalgalı dondurarak kurutulma	1.6 W/g mikrodalga gücü, 55 C ısıtma rafı sıcaklığı			

2.1. Enerji Tüketimi ve Isıl Verimlilik

Kurutma işlemi için ısı enerjisi gereksinimi, fosil yakıtlar, biyokütle ve güneş enerjisi gibi kaynaklarla ile karşılanır. Enerji maliyeti, fosil yakıt kaynaklarının sürekli tükenmesi ve yüksek enerji fiyatları nedeniyle her geçen gün artmaktadır (Rabha vd., 2017). Günümüzde kurutucuların tasarımında sadece enerji maliyeti ve ekonomi değil aynı zamanda çevresel etkiler de önemli olmuştur. Bu nedenle kurutulan ürünlerin kalitesinden ödün vermeden, enerji tüketimini ve çevresel etkiyi azaltmak için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı yoğunlaşmıştır. Optimize etme ve tasarım, mümkün olan en yüksek verimlilik için ürünlerin kuruma süresini azaltma eğilimindedir (Morad vd., 2017). Ng vd. (2017) Clinacanthus Nutans Lindau yapraklarını kuruttuğu çalışmasında isı pompası destekli güneşte kurutma sisteminin ısıya duyarlı kuru ürünlere alternatif olacağını ve ürünün fizikokimyasal özelliklerin değişmesinden kaynaklanan hasat sonrası kayıpları en aza indireceğini belirtmiştir. Bu sistem, nemli ortam koşulları altında güneşle kurutma işleminin etkin olmayan şekilde çalışması ve ısı pompalı kurutma işleminin pahalı çalışması gibi, güneşte kurutma veya ısı pompasının ayrı ayrı kullanılmasının dezavantajlarını ortadan kaldırmıştır. Entegre sistem, kontrol edilebilir kurutma ortamı nedeniyle daha yüksek enerji verimliliği sağlamaktadır.

Nem taşıma mekanizması ve malzemenin kuruma hızının kurutulmuş ürünün kalite özellikleriyle ilişkili olduğu kanıtlanmıştır (Krokida ve Maroulis, 2000). Yüksek sıcaklıkta kurutma, daha düşük kalitede ürün ortaya çıkarır, çünkü özellikle bazı hassas ürünler daha yüksek gerilim çatlaklarına sahiptir, kullanım sırasında mekanik darbeye daha az dayanıklıdır ve çoğu zaman ısıyla zarar görür (Estrada ve Litchfield, 2008). Yüksek sıcaklık ve hızlı akış hızı, nem giderme hızını artırabilir; ancak, bu iki parametre, özellikle kurutma işleminin sonuna doğru iç nemi uzaklaştırmada önemli bir rol oynamaz. Çalışma sıcaklığı ve akış hızını ilk etapta olduğu kadar yüksek tutmak sadece bir enerji kaybıdır, iç nem taşınımı iç difüzyon ile yönetilir. Bu durumda, dış hava sıcaklığı ve hava akışı, iç nem difüzyonunu desteklemez (Jangam vd., 2010). Torke-Harchegani vd. (2016) çalışmasında kurutma sıcaklığındaki artışın, etkin

nem yayılımını 1.1103×10^{-10} ila 4.1397×10^{-10} arasında ve konvektif nem transfer katsayısını 2.6433×10^{-7} ila 8.7203×10^{-7} arasında değiştirerek, kütle transfer parametrelerini arttırdığını belirlemiştir.

Kurutma, ısı uygulamasından dolayı eşzamanlı ısı ve kütle transfer işleminden kaynaklanan üründen nemin çıkarılmasını içerir (Onwude vd., 2016). Neredeyse her işlem, ürünün fiziksel, kimyasal ve depolama özelliklerini değiştirmek için ısı girişi veya ısının uzaklaştırılmasını gerektirir. Kütle transferi, mikrobiyal aktivite ve bozulma reaksiyonları için suyun varlığını azaltarak gıdaları koruyan süreçlerin önemli bir özelliğidir (Karel ve Lund, 2003). Kurutma işlemi sırasında sabit bir kütle ve ısı transferi meydana gelir. Bu karmaşık sürecin parametrelerinin mühendislik açısından iyi anlaşılması çok önemlidir. Kurutma işleminin matematiksel modellemesi, hem yeni kurutma sistemlerinin tasarlanması ve iyileştirilmesi hem de kurutma işleminin kontrol edilmesi için kullanılabilir (Gulcimen vd., 2016). Ndukwu vd. (2017) dilimlenmiş üç çeşit cocoyam varyetesinin ısı ve kütle transferini ve B vitamini muhafazasını incelemişlerdir. Üç çeşit için kütle transferi katsayısı 1.01044×10^{-6} ile 3.44876×10^{-6} m/s, ısı transferi katsayısı 1.17973 ile 3.58284 W/m²K arasında bulunmuştur. Agrawal ve Methekar (2017) konvektif (taşınımlı) kabak kurutmada çizgiler (MOL) yöntemini kullanarak ısı ve kütle transferi için model oluşturmuşlardır. Efektif difüzyon için farklı cebir sistemleri içinden Arrhenius parametrelerinin (aktivasyon enerjisi ve preeksponensiyel faktör) deneysel sonuçlarla iyi uyum sağladığını belirlemişlerdir.

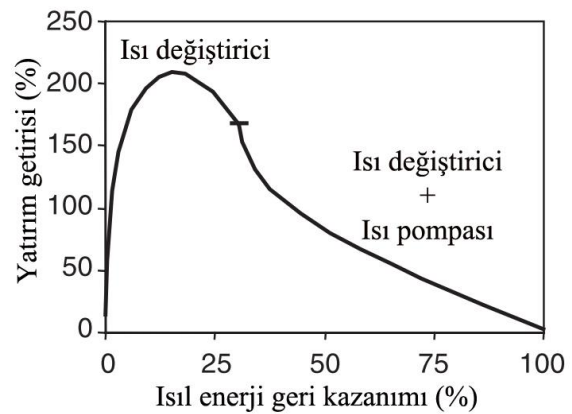
Bazı gıdalar ve baharatlar ve otlar gibi diğer tarımsal ürünler ısıya duyarlı olduğundan, bunların düşük sıcaklıklarda işlenmesi arzu edilir. Bu koşullar altında kuruma hızını arttırmak için gerekli olan kütle transferi için itici güç çeşitli stratejilerle artırılabilir. Sıcak havanın bağıl nemini azaltmak, bu tür bir yaklaşımdır, bu da havanın nem alma kapasitesini artırır, böylece kurutma hızını artırır. Radyofrekans ısıtma gibi dielektrik ısıtmanın uygulanması, kurutma oranının artırılabilmesi başka bir yöntemdir. Mikrodalgalardan daha düşük frekansa sahip radyo frekans dalgaları, özellikle kurutma işleminin son aşamalarında, kurutma için iyi sonuçlar ortaya çıkarmaktadır (Madhava Naidu vd., 2016).

Geleneksel kurutma yöntemleri, uzun kuruma süresini ve yüksek miktarda enerji tüketir (Hemis vd., 2017). Yeni kurutma teknolojileri ile kurutma sürelerinde farkedilir oranda değişiklik ve düşük enerji tüketimi ile ürün kalitesinin iyileştirilmesi gerçekleştirilmektedir. Kurutma için %1'lik bir enerji verimliliğinin, üretim karında %10'luk artış sağladığı bilinmektedir (Ho vd., 2002). Hibrit kurutma veya çok kademeli kurutma işlemini, geleneksel kurutma ile karşılaştırıldığında genel olarak enerji tüketimini azaltabilmektedir. Xu vd. (2006) düşük maliyetle yüksek kaliteli kurutulmuş çilekler için bir vakumlu kurutma kurutma (FD) ve ardından sıcak hava ile kurutma (AD) ve iki aşamalı hibrit yöntemi FD ve AD'yi (FAD) içeren kurutma işlemlerini uyguladığı çalışmada, iki aşamalı FAD sürecinin toplam sermayesi ve işletme maliyetlerinin, yaklaşık olarak yalnızca FD'nin yarısı kadar olduğunu belirtmişlerdir. Horuz vd. (2017), ekşi kirazları 50, 60 ve 70°C'de konveksiyonel (CD) ve 50, 60 ve 70°C'de sıcak hava ile bağlanmış 120, 150 ve 180 W'da hibrit (HD; mikrodalga-konveksiyonel) kurutma ile kurutmuşlardır. CD ve HD sistemleri için sıcak hava sıcaklığı ve mikrodalga gücünde artış ile toplam enerji tüketimi ve özgül enerji gereksiniminin azaldığı görülmektedir. Kurutma süresi, hava sıcaklığı ve mikrodalga gücünde artış ile azalmıştır ve bu nedenle kurutma sistemlerinin enerji tüketimi de azalmıştır. HD tekniğinin enerji verimliliği, CD yönteminden daha yüksek olarak belirlenmiştir. Samadi vd. (2014), endüstriyel uygulamalarda geleneksel kurutuculara alternatif olarak geliştirdikleri BIG (birleşik ısı ve güç kurutma sistemi) kurutucusuyla farklı kalınlıklardaki muz dilimlerinin farklı kurutma yüklerindeki kurutma davranışlarını, sistemin enerji tüketimi ve verimini incelemiştir. Farklı kurutma yükleri ve ürün kalınlıklarında muz dilimleri ile çalışılan BIG ile yapılan kurutma, enerji etkililiğini önemli derecede (%11-20) arttırırken; spesifik enerji tüketimi, ürün kalınlığının azalmasıyla azalma göstermiştir. Cao vd. (2017), dondurarak kurutma işleminin maliyetini düşürmek için mikrodalga destekli kurutma teknolojisi kullanarak, geleneksel dondurarak kurutmaya göre enerji tüketiminin yaklaşık %40 azaldığını belirlemişlerdir. Szadzinska vd. (2017) çalışmasında hibrit kurutma yöntemlerinin kuruma süresini önemli ölçüde kısalttığı, enerji tüketimini azalttığı ve ürün kalite faktörlerini olumlu yönde etkilediği belirtmiştir. Dhanushkodi vd. (2017), güneş enerjili biyokütle hibrit kurutucuda kaju çekirdeğinin kurutma kinetiğini araştırmış ve kurutma davranışını matematiksel modeller kullanılarak analiz etmişlerdir.

Klasik endüstriyel kurutucular genellikle %30-70 verimlilik seviyelerinde çalışırlar. Genel olarak geleneksel kurutucular, zayıf tasarımı ve bilgi eksikliği nedeniyle düşük enerji verimliliği ile çalıştırılır. Geleneksel kurutuculardaki verimsizlik, egzoz kurutma ortamının boşaltılmasında enerji kaybı (ısı

geri kazanım yöntemleri ve geri dönüşüm egzoz ortamı ile çözülebilir), ısı izolasyonu yetersizliği (kurutma kabini ve boruların izolasyonu ile çözülebilir), kurutma malzemesi ve kurutma ortamı arasındaki düşük temas verimliliği, uygunsuz kurutma stratejileri gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır (Jangam vd., 2010). Qiu vd. (2016) güneş enerjisi destekli ısı pompalı kurutma sistemi ile yaptığı çalışmalarında, bu sistemin ısı geri kazanımı ve termal depolama ile enerji tüketiminin %40.53 oranında azaltılabileceğini belirtmişlerdir. Turp, biber ve mantar kurutma işlemleri için geri ödeme süresini sırasıyla 6 yıl, 4 yıl ve 2 yıl olarak belirlemişlerdir. Rabha vd. (2017) tasarladığı zorlanmış konveksiyonlu güneş enerjili tünel kurutucusunda, kurutma odasının daha yüksek ekserji ve daha düşük termal verimliliğin, kurutma odasının egzozu ile kaybolan kayda değer enerji ile ortaya çıktığını belirtmişlerdir.

Birçok endüstriyel operasyonun enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik anahtar yaklaşımlardan biri, olası tüm atık ısı kaynaklarını geri kazanmak ve faydalı çıktılara dönüştürmektir (Chua vd., 2010). Isı geri kazanımı ile uzaklaştırılan her birim su için daha az enerji tüketilir. Çok aşamalı sistemler, farklı kurutma ve donma odalarından daha iyi ısı geri kazanımıyla toplam işletme maliyetlerini azaltabilirler (Chua vd., 2007). Konvektif kurutmada geleneksel ısı geri kazanımı, kurutucu çıkış havasını kullanarak, kurutucu giriş havasının ön ısıtmasını ifade eder. Bunun için genellikle ısı değişimi, ısı pompalama ve bu ikisinin kombinasyonu gibi yöntemler kullanılır (Krokida ve Bisharat, 2004). Daghigh ve Shafieian (2016) çalışmalarında tasarladıkları sistemde kurutucunun genel verimliliğini arttırması ve güneş enerjisi alımını maksimum düzeyde kullanmak için tasarladığı bir su ısı geri kazanım sistemi ile ısı geri kazanım sisteminin etkinliğini belirtmiştir.



Şekil 1. Isıl enerji geri kazanım sistemleri için teknik ve ekonomik fizibilite (Krokida ve Bisharat, 2004)

Bir enerji kazanım sistemi seçimi yapılırken Şekil 1'de gösterildiği gibi bilgilendirici bir şemaya gerek vardır. Isıl enerji geri kazanım hedefi arttıkça karlılık maksimum seviyeye çıkar ve daha sonra azalır. Maksimum seviye tek bir ısı değiştirici aralığındadır. Mevcut sermayeye ve istenen yatırım

getirisine bağlı olarak, uygun enerji geri kazanım sistemi seçilmelidir (Krokida ve Bisharat, 2004).

3. Kurutmanın Ürün Kalitesine Etkileri

Tüketiciler tüketilen gıdaların besin içeriği ve sağlığa olan etkisi konusunda daha fazla farkındalık nedeniyle yüksek değerli sağlık ürünlerini tüketme eğilimindedir (Dikmen vd., 2018). Kurutma sonrası ürün kalitesindeki değişiklikler, kurutma süresi ve işlem modellemesinin tahmini için gerekli olmasa da kurutulmuş ürünün niteliğinin belirlenmesi ve öngörülmesi, istenilen özelliklere sahip ürünlerin geliştirilmesi veya mevcut ürünlerin kalitesinin iyileştirilmesi için çok önemlidir. Kurutma işleminin tamamlanmasından sonra ürün kalitesinin incelenmesi bir dizi parametreyi kapsar: yapısal özellikler (yoğunluk, porozite, gözenek boyutu, özgül hacim), renk özellikleri (renk, görünüş), dokusal özellikler (sıkıştırma testi, stres gevşeme testi, çekme testi), ısıl özellikler (ürünün durumu: camsı, kristal, lastik), duyu özellikler (aroma, tat, lezzet), beslenme özellikleri (vitaminler, proteinler) ve rehidrasyon özellikleri (rehidrasyon hızı, rehidrasyon kapasitesi) (Krokida ve Maroulis, 2000, Szadzinska vd., 2017).

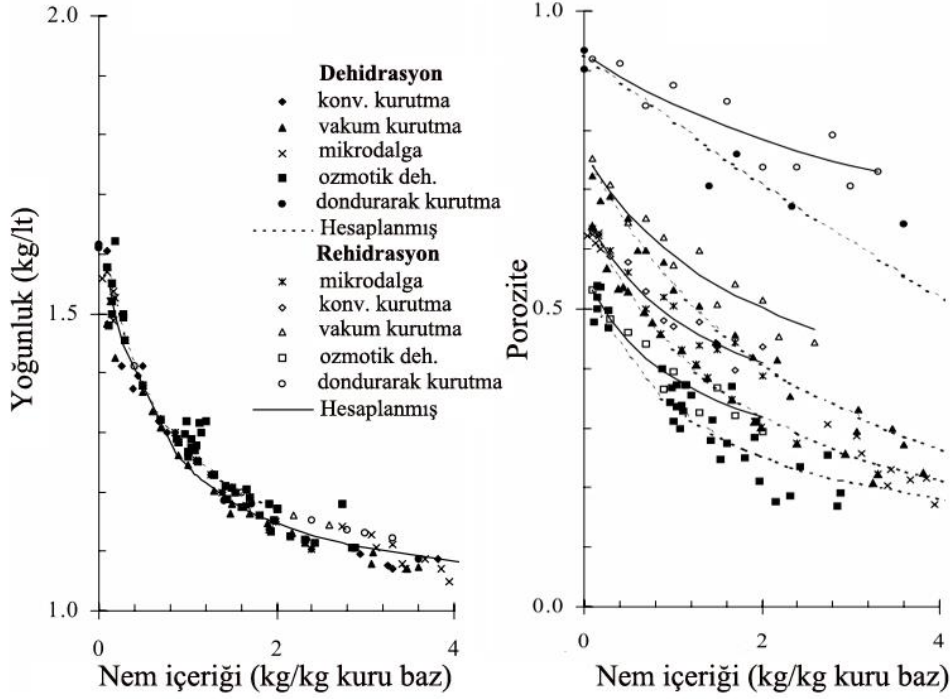
Kurutma süreci sırasında ve sonrasında istenmeyen fiziksel olaylar yaygın olarak görülür. Hücresel gıdaların hava ile kurutulması sırasında suyun uzaklaştırılması ve yüksek sıcaklıklar, hücrelerin ve gözeneklerin çökmesine, şekil değişmesine ve boyutta azalmaya neden olabilecek önemli bir stres yaratır (Nguyen vd., 2018). Oikonomopoulou ve Krokida (2012), farklı kurutma basınçlarında dondurularak kurutulmuş patates, mantar ve çilek ürünlerinin yapısal ve termofiziksel özelliklerini inceledikleri çalışmalarında kurutma basıncının azalmasının porozitede artışa neden olduğunu belirtmişlerdir.

Tüm gıda ürünleri kurutma işlemi sırasında bazı boyut değişikliklerine maruz kalır. Kurutma sırasında ürün hacminin ilk ürün hacmine oranı olan büzüşme, hava dehidrasyonunda, ürünün kalitesini etkileyen çeşitli problemlere neden olan önemli bir sorundur. Büzüşme stresi, hücre duvarlarının çok sayıda kırılmasına neden olabilir ve malzemenin içinde çok sayıda küçük boşluk oluşmasına neden olabilir; aynı zamanda ısı ve kütle taşıma özelliklerini, özellikle ısı ve kütle yayılmalarını, ürün yüzey alanını ve moleküler difüzyon mesafesini de etkileyerek, genel kuruma hızını sınırlandırmaktadır. Büzüşmenin sonucu ürün boyutunu, yapısını, rengini, tadını ve aromasını etkilemektedir (Nguyen vd., 2018, Saha vd., 2018). Nem içeriğinin genel olarak azalmasıyla büzülmenin arttığı, ancak büzüşme özelliklerinin kurutulan ürünler ve kurutma yöntemleri arasında farklılaştığı görülmektedir (Jangam vd., 2010). Sette vd. (2016) ahududuyu hava ile kuruttuklarında büzüşme, %81

iken; bu değer dondurarak kurutmada %11'e düşmüştür. Song vd. (2016) ısı pompası teknolojisi ile kuruttukları Chinese Yam cipslerinde büzüşmeyi %75 olarak belirlemişlerdir. Liliana vd. (2015), çalışmada dondurarak kurutmada çoğu meyvede rengin aynı kaldığı ve dondurulmuş meyvelerin porozitelerinin dondurulma hızına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Parniakov vd. (2016), elma dokusunun darbeli elektrik alanlı vakumlu dondurarak kurutulması çalışmasındaki mikroskopik ve makroskobik analizler, bu yöntemin kurutulmuş örneklerin şeklinin korunmasını kolaylaştırdığını, büzüşmeyi önlediğini ve doku gözeneklerinin artmasına neden olduğunu belirlemiştir.

Kurutulmuş ürünün tüketim modelleri göz önüne alındığında, rehidre edilmiş ürünün doku özellikleri büyük önem taşımaktadır (Xu vd., 2017). Deformasyonun tahmin edilmesi, kurutulmuş ürünün kalitesini kontrol etmek için önemlidir (Azzouz vd., 2018). Üründeki iç su iletimi, nem içeriği ve kurutulduktan sonraki meyve içindeki dağılımı, ürünün nihai mikro yapısı, sorpsiyon ve rehidrasyon davranışı ve yüzey setleşmesi seviyesi için belirleyicidir (Defraeye vd., 2016). Rehidrasyon kapasitesi, hücre yapısı ve su tutma kapasitesi gibi fiziko-kimyasal değişimleri gösterebileceğinden, kurutulmuş ürünler için önemli kalite özelliklerinden biridir. Hızlı ve tam rehidrasyon, kurutulmuş ürünlerin istenen bir özelliğidir (Wang vd., 2018). Liliana vd. (2015) çalışmalarında dondurarak kurutmanın kurutulmuş ürünlerin rehidrasyon kapasitesini arttırdığını gözlemlerken, ürünlerde yapısal çökmeler de gözlemlenmiştir. Artnaseaw vd. (2010), çalışmalarında vakumlu ısı pompalı bir kurutucuda farklı sıcaklık ve basınçlarda Şitaki mantarı ve Jindakırmızıbiberinin kuruma karakteristiklerini araştırmışlardır. Kuruma zamanının, kuruma sıcaklığı ve vakum basıncı artışı ile azaldığı belirlenmiştir. Mantar ve kırmızıbiberin kurutulmasında kurutma basıncının artmasıyla renk bozulması artarken, rehidrasyon kapasitesi azalmıştır. Askari vd. (2016) elma dilimlerini kuruttuğu çalışmada, hava ile, dondurularak ve mikrodalgada kurutulmuş elma dilimlerinin rehidrasyon oranları sırasıyla 4.04, 4.84 ve 6.76 olarak belirlemişlerdir.

Kurutma sırasında meydana gelen yapısal değişiklikler, basit bir su ilavesi ile geri alınamaz. Kurutulmuş ürünlerin rehidrasyon sırasında yapısal özelliklerinin incelenmesi, kurutmanın neden olduğu malzemenin yaralanmasının bir ölçüsüdür. Rehidrasyon derecesi de yapısal bozulma derecesine bağlıdır. Kurutma yönteminin elmanın yapısal özellikleri üzerindeki etkisi, Şekil 2'de gösterilmektedir (Krokida ve Maroulis, 2000).



Şekil 2. Farklı kurutma yöntemlerinin elmanın yoğunluk ve porozite değerleri üzerindeki etkisi (Krokida ve Maroulis, 2000)

Kurutmada ürünün besin değerlerinin en üst düzeyde korunması amaçlanır. Ürünün sıcaklığı arttıkça, reaksiyon hızı sabiti artmaktadır. Reaksiyon sabitinin sıcaklığa bağlılığı, düşük sıcaklıkta kurutma işleminin daha az besin bozulmasıyla sonuçlanacağı anlamına gelir. Daha uzun bir sabit kurutma hızı periyodu, besin maddesi tutulmasını arttırmaktadır (Chou ve Chua, 2001).

Hava akışı ile kurutma, mikrodalga kurutma ve dondurarak kurutma gibi birçok geleneksel ısı yöntem, düşük kuruma hızlarının yanı sıra, genellikle nihai üründe istenmeyen termal bozulmalara yol açmaktadır (Thirugnanasambandham ve Sivakumar, 2016). Xu vd. (2018) çalışmasında havuç küplerinin kurutulmasında ortalama sıcaklık gradyanının düşmesiyle, renk farkı ve rehidrasyon kapasitesinin azaldığını, fakat kurutma süresinin arttığını tespit etmişlerdir. Hem en yüksek hem de en düşük ortalama sıcaklık gradyanı, kötü ürün kalitesi ile sonuçlanmıştır. En yüksek kaliteye sahip ürün, 6°C/mm ortalama sıcaklık gradyanında elde etmişlerdir.

Kurutulmuş gıdaların renk ve şekil özellikleri tüketicinin yiyecek seçimlerini, algılarını ve satın alma davranışını etkilediğinden, tüketicilerin tercihlerini belirleyen önemli unsurlardan biridir. Daha yüksek sıcaklıklar, daha yüksek kuruma hızlarına yol açarak

işlem süresini kısaltır. Nem uzaklaştırma hızı, kuruyan ürünlerin renk değişikliklerini doğrudan etkiler. Fakat renk değişim oranlarının, kurutma başlangıcındaki düşük sıcaklıklardan daha yüksek olduğu görülmektedir (Song vd., 2016, Muliterno vd., 2017). Renk aynı zamanda ısıl işlem şiddetinin bir göstergesidir ve ısıya maruz kalmanın neden olduğu kalite bozulmasını tahmin etmek için kullanılabilir (Wang vd., 2018). İyi kalitede kurutulmuş ürünler elde etmek için uygun kurutma koşullarını seçmek önemlidir. Farklı kurutma yöntemleri ile yapılan bazı kurutma çalışmalarının renk ölçüm sonuçları Tablo 2’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tüketim alışkanlıklarının belirlenmesinde renk ve şekil gibi görünüş özellikleri kadar aroma, tat ve lezzet gibi duyu özellikler de önemlidir. Aroma algılayan hızlı ve tahribatsız bir yöntem olan elektronik burun, aynı zamanda farklı olgunlaşma aşamalarını ayırt edebilir (Huang vd., 2016). Xu vd. (2017) orta dalga kızılötesi radyasyon kurutma öncesi düşük frekanslı ultrason ön işleminin etkisi ile kuruttuğu havuç dilimlerinde, elektronik burun sonuçları, kurutulmuş havucun aromatik ve uçucu organik bileşiklerinin sonike edilmiş ön-muamele ile arttığını, nitrojen oksitlerin azaldığını ve düşük frekanslı ultrasonun kurutulmuş havuç dilimlerinin lezzetini artırabildiğini göstermiştir.

Tablo 2.Farklı yöntemlerle kurutulmuş ürünlerin renk analizi örnekleri

Materyal	Kurutma yöntemi	Son nem içeriği	L	a	b	ΔE	Referans
Clinacanthus nutans Lindau yaprakları	Isı pompalı ve güneş enerjili	%35.84*	17.1±0.33	3.9±0.33	11±0.33	20.65	Ng vd. (2017)
Şitaki mantarı	Taze	%13 **	51.43±2.65	7.64±0.19	18.79±1.44	-	Tian vd. (2016)
	Sıcak hava		41.20±1.72	5.58±0.71	13.47±1.61	11.71±2.88	
	Vakum		47.23±1.93	6.41±0.79	16.48±1.67	4.95±2.25	
	Mikrodalga		32.47±3.16	5.94±1.04	12.51±2.10	14.93±3.13	
	Vakumlu mikrodalga		46.91±1.93	6.22±0.68	16.06 ± 0.87	5.47±1.98	
Chinese Yam cipsleri	Isı pompalı (HP)	18.1	58.90±1.87	5.19±0.42	26.39±0.90	26.89±0.79	Song vd. (2016)
	HP+Kızılötesi (500 W)	16.9	64.13±1.98	4.73±1.37	27.37±1.06	23.85±0.46	
	HP+Kızılötesi (1000 W)	12.1	66.98±1.45	3.98±0.25	28.17±0.99	22.61±0.62	
	HP+Kızılötesi (2000 W)	11.5	58.34±1.03	5.43±0.22	40.12±0.83	37.20±0.84	
Mantar dilimleri	Taze	10.48 ***	82±2	-0.3±1	11.2±0.7	-	(Carrión vd. (2018))
	Atmosferik dondurarak	0.12***	72±4	0.05±1	16±6	15±4	
	Ultrason destekli dondurarak (12.3 kW/m ³)	0.75***	57±2	4.1±0.9	16±2	24±4	
	Ultrason destekli dondurarak (24.6 kW/m ³)	0.75***	61±1	4±3	16±3	24.3±0.8	
	Vakumlu dondurarak	0.07***	71±4	2.1±0.5	17±1	8±3	
Cherry domates	Taze	0.10 nem oranı	46.2±0.9	38.7±0.8	32.9±0.6	-	İsmail ve Akyol (2016)
	Önişlemlenmiş güneşte		33.8±0.7	20.4±0.9	21.8±0.4	24.73	
	Güneşte doğal		32.9±0.8	17.2±0.5	19.4±0.5	28.66	

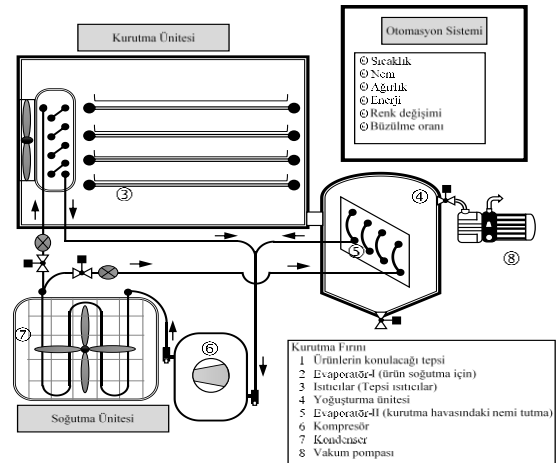
*kurubaz; **yaşbaz; ***kg su/kg kurumadde

L*, a* ve b* değerleri sırasıyla parlaklığı (daha yüksek parlaklık gösteren daha yüksek L* değeriyle), kırmızı-yeşil (pozitif değer kırmızılığı, negatifliği yeşillik) ve sarı-maviyi (pozitif değer sarılığı, negatif değer maviliği) temsil eder (Chua vd., 2004, Zhou vd., 2017). Renk farkı (ΔE), kurutma sırasında renk değişimini tanımlamak için kullanılmaktadır. Renk 'duyusal' değerlendirmesi için, ΔE çok önemli bir belirleyici niteliktedir. Duyusal değerlendirme, 0-0.5 arası izlenme düzeyinde farklılık, 0.5 - 1.5 arası zayıf farklılık, 1.5 - 3.0 arası farkedilebilir farklılık, 3.0 - 6.0 arası kayda değer farklılık, 6.0 - 12.0 arası büyük farklılık ve > 12.0 çok açık farklılık olarak tanımlanabilir (Chen ve Mujumdar, 2008).

4. Örnek Bir Uygulama

Bu kısımda dondurarak vakumlu kurutma yapması planlanan bir kurutma sisteminin tasarımı ve şematik resimleri verilmiştir. Uygulama kapsamında tasarımı yapılandırılarak kurutma sisteminin temel çalışma şeması Şekil 3' de, kurutma fırını Şekil 4' de verilmiştir.

Kurutulacak ürünün önce dondurulmasını sonrasında vakum basıncı altında kurutulmasını sağlayacak olan kurutma fırını; kurutma ünitesi, soğutma ünitesi ve otomasyon ünitesi olmak üzere 3 ana kısımdan oluşmaktadır.



Şekil 3. Dondurarak kurutma metoduyla çalışan kurutucu şeması



Şekil 4. Dondurarak kurutma fırını

İmalatı yapılan sistemde dondurma işlemi sürecinde; kurutma yapan fırın önce kurutulacak ürünün dondurulmasını için bir dondurucu gibi çalışmaktadır. Çalışma kapsamında kurutulacak ürünler -20 ila -30°C arasında sıcaklıklarda dondurulacaktır. Kurutma sürecinde; vakum basıncında dondurulmuş olan ürüne düşük seviyede ısı enerjisi verilerek suyun buharlaştırılması sağlanacaktır. Üründen buharlaşan su, üründen farklı bir bölmede düşük sıcaklıktaki (-50°C) bir eşanjör yardımıyla dondurulacaktır. Kurutma sürecinde ürünün 0°C sıcaklığa ulaşana kadar üründeki nemin $\%10-15$ arasında olması gerekmektedir. Ürün vakum basıncı altında $30-40^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa kadar ısıtılmaya devam edilerek ürünün istenilen kuruluğa ($\%7-9$) ulaşması istenmektedir. Yüksek sıcaklık kuruma süresinin kısalmasını sağlarken, üründeki fiziksel ve kimyasal yapının bozulmasını arttırmaktadır. Kurutulacak olan ürünler için farklı sıcaklıklar için denemeler yapılmalı ve ideal sıcaklık değerleri tespit edilmelidir.

5. Sonuç

Literatüre dayanarak güneşte kurutma gibi geleneksel kurutma yöntemlerinin geliştirilmiş kurutma teknolojileriyle değiştirilmesi ürün kalitesinin artması ve enerji verimliliği için oldukça önemlidir. Mikrodalga, dondurarak, sıcak hava ile kurutma gibi teknolojilerin tek başlarına kullanılmasındansa, bu sistemlerin farklı kombinasyonlarının kullanılması kurutma süresi, enerji tüketimi ve ürün kalitesi açısından daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Örneğin daha çok hassas ürünler için kullanılan dondurarak kurutma teknolojisi gibi çok maliyetli kurutma yöntemlerinde mikrodalga ya da ultrason gibi ön işlem teknolojileri kullanarak daha kısa sürede kurutma ve dolayısıyla daha az enerji tüketimi ile neredeyse aynı kalitede ürün elde edilebilmektedir. Endüstri alanında en çok enerji tüketen işlemlerden biri olması nedeniyle kurutma

alanındaki teknolojilerin geliştirilmesi ve daha kaliteli nihai ürünler elde edilebilmesi için daha fazla araştırma yapılmalıdır.

Teşekkür

Bu çalışma 4822-D1-16Nolu proje ile desteklenmiştir. Yazarlar maddi desteklerinden dolayı SDÜ BAP yönetimine teşekkür eder.

Kaynakça

- [1] Agrawal, S. G. ve Methekar, R. N. 2017. Mathematical model for heat and mass transfer during convective drying of pumpkin. *Food and Bioproducts Processing*, 101 (2017), 68-73.
- [2] Aktas, T., Fujii, S., Kawano, Y. ve Yamamoto, S. 2007. Effects of pretreatments of sliced vegetables with trehalose on drying characteristics and quality of dried products. *Food and Bioproducts Processing*, 85 (2007), 178-183.
- [3] Aktaş, M., Khanlari, A., Amini, A. ve Şevik, S. 2017. Performance analysis of heat pump and infrared-heat pump drying of grated carrot using energy-exergy methodology. *Energy Conversion and Management*, 132 (2017), 327-338.
- [4] Artnaseaw, A., Theerakulpisut, S. ve Benjapiyaporn, C. 2010. Drying characteristics of Shiitake mushroom and Jinda chili during vacuum heat pump drying. *Food and Bioproducts Processing*, 88 (2010), 105-114.
- [5] Askari, G. R., Emam-Djomeh, Z. ve Mousavi, S. M. 2016. Effects of combined coating and microwave assisted hot-air drying on the texture, microstructure and rehydration characteristics of apple slices. *Food Science and Technology International*, 12 (2016), 39-46.
- [6] Azzouz, S., Hermassi, I., Chouikh, R., Guizani, A. ve Belghith, A. 2018. The convective drying of grape seeds: Effect of shrinkage on heat and mass transfer. *Journal of Food Process Engineering*, 41 (2018), e12614.
- [7] Bai, Y., Yang, Y. ve Huang, Q. 2012. Combined electrohydrodynamic (EHD) and vacuum freeze drying of sea cucumber. *Drying Technology*, 30 (2012), 1051-1055.
- [8] Cao, X., Zhang, M., Mujumdar, A. S., Zhong, Q. ve Wang, Z. 2017. Effects of ultrasonic pretreatments on quality, energy consumption and sterilization of barley grass in freeze drying. *Ultrason Sonochem*, 40 (2017), 333-340.
- [9] Carrión, C., Mulet, A., García-Pérez, J. V. ve Cárcel, J. A. 2018. Ultrasonically assisted atmospheric freeze-drying of button mushroom. *Drying kinetics and product quality. Drying Technology*, (2018), 1-10.
- [10] Chapchaimoh, K., Poomsa-ad, N., Wiset, L. ve Morris, J. 2016. Thermal characteristics of heat pump dryer for ginger drying. *Applied Thermal Engineering*, 95 (2016), 491-498.

- [11] Chen, X. D. ve Mujumdar, A. S. 2008. *Drying Technologies in Food Processing*, Blackwell Publishing Ltd: 350.
- [12] Chou, S. K. ve Chua, K. J. 2001. New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuff. *Trends in Food Science & Technology*, 12 (2001), 359-369.
- [13] Chua, K. J., Chou, S. K., Ho, J. C. ve Hawlader, M. N. A. 2007. Heat pump drying: Recent developments and future trends. *Drying Technology*, 20 (2007), 1579-1610.
- [14] Chua, K. J., Chou, S. K., Mujumdar, A. S., Ho, J. C. ve Hon, C. K. 2004. Radiant-convective drying of osmotic treated agro-products: effect on drying kinetics and product quality. *Food Control*, 15 (2004), 145-158.
- [15] Chua, K. J., Chou, S. K. ve Yang, W. M. 2010. Advances in heat pump systems: A review. *Applied Energy*, 87 (2010), 3611-3624.
- [16] Colucci, D., Fissore, D., Rossello, C. ve Carcel, J. A. 2018. On the effect of ultrasound-assisted atmospheric freeze-drying on the antioxidant properties of eggplant. *Food Res Int*, 106 (2018), 580-588.
- [17] Cuccurullo, G., Giordano, L., Metallo, A. ve Cinquanta, L. 2018. Drying rate control in microwave assisted processing of sliced apples. *Biosystems Engineering*, 170 (2018), 24-30.
- [18] Çakmak, R. Ş., Tekeoğlu, O., Bozkır, H., Ergün, A. R. ve Baysal, T. 2016. Effects of electrical and sonication pretreatments on the drying rate and quality of mushrooms. *LWT - Food Science and Technology*, 69 (2016), 197-202.
- [19] Daghigh, R. ve Shafieian, A. 2016. Energy-exergy analysis of a multipurpose evacuated tube heat pipe solar water heating-drying system. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 78 (2016), 266-277.
- [20] Defraeye, T., Nicolai, B., Mannes, D., Aregawi, W., Verboven, P. ve Derome, D. 2016. Probing inside fruit slices during convective drying by quantitative neutron imaging. *Journal of Food Engineering*, 178 (2016), 198-202.
- [21] Dhanushkodi, S., Wilson, V. H. ve Sudhakar, K. 2017. Mathematical modeling of drying behavior of cashew in a solar biomass hybrid dryer. *Resource-Efficient Technologies*, (2017),
- [22] Dikmen, E., Ayaz, M., Kovacı, T. ve Şencan Şahin, A. 2018. Mathematical modelling of drying characteristics of medical plants in a vacuum heat pump dryer. *International Journal of Ambient Energy*, (2018), 1-8.
- [23] Estrada, J. A. ve Litchfield, J. B. 2008. High humidity drying of corn: Effect on drying rate and product quality. *Drying Technology*, 11 (2008), 65-84.
- [24] Gulcimen, F., Karakaya, H. ve Durmus, A. 2016. Drying of sweet basil with solar air collectors. *Renewable Energy*, 93 (2016), 77-86.
- [25] Hemis, M., Gariépy, Y., Choudhary, R. ve Raghavan, V. 2017. New coupling model of microwave assisted hot-air drying of a capillary porous agricultural product: Application on soybeans and canola seeds. *Applied Thermal Engineering*, 114 (2017), 931-937.
- [26] Ho, J. C., Chou, S. K., Chua, K. J., Mujumdar, A. S. ve Hawlader, M. N. A. 2002. Analytical study of cyclic temperature drying: effect on drying kinetics and product quality. *Journal of Food Engineering*, 51 (2002), 65-75.
- [27] Horuz, E., Bozkurt, H., Karatas, H. ve Maskan, M. 2017. Effects of hybrid (microwave-convective) and convective drying on drying kinetics, total phenolics, antioxidant capacity, vitamin C, color and rehydration capacity of sour cherries. *Food Chem*, 230 (2017), 295-305.
- [28] Huang, J., Zhang, M., Adhikari, B. ve Yang, Z. 2016. Effect of microwave air spouted drying arranged in two and three-stages on the drying uniformity and quality of dehydrated carrot cubes. *Journal of Food Engineering*, 177 (2016), 80-89.
- [29] Huang, L.-l., Zhang, M., Mujumdar, A. S. ve Lim, R.-x. 2011. Comparison of four drying methods for re-structured mixed potato with apple chips. *Journal of Food Engineering*, 103 (2011), 279-284.
- [30] Islam, M. N., Zhang, M., Adhikari, B., Xinfeng, C. ve Xu, B.-g. 2014. The effect of ultrasound-assisted immersion freezing on selected physicochemical properties of mushrooms. *International Journal of Refrigeration*, 42 (2014), 121-133.
- [31] İsmail, O. ve Akyol, E. 2016. Open-air sun drying: the effect of pretreatment on drying kinetic of cherry tomato. *Sigma J Eng & Nat Sci*, 34 (2016), 141-151.
- [32] Jangam, S. V., Law, C.-L. ve Mujumdar, A. S. 2010. Drying of foods vegetables and fruits
- [33] Jiang, J., Dang, L., Yuensin, C., Tan, H., Pan, B. ve Wei, H. 2017. Simulation of microwave thin layer drying process by a new theoretical model. *Chemical Engineering Science*, 162 (2017), 69-76.
- [34] Karel, M. ve Lund, D. B. 2003. *Physical principles of food preservation*. New York, Marcel Dekker Inc.639.
- [35] Krokida, M. K. ve Bisharat, G. I. 2004. Heat recovery from dryer exhaust air. *Drying Technology*, 22 (2004), 1661-1674.
- [36] Krokida, M. K. ve Maroulis, Z. 2000. *Quality changes during drying of food materials*. Drying Technology in Agricultural and Food Sciences, Science Publishers.
- [37] Kumoro, A. C., Pestaño, L. D. B., Bautista, J. P. T., Leguiab, R. J. R. H., Puri, S. D. D., Hadiyanto, Roces, S. A., Yung, L., Rong, X., Lothongkum, A. W., Phong, M. T., Hussain, M. A., Daud, W. R. W. ve Nam, P. T. S. 2018. Mathematical modeling of the drying kinetics of thinly-sliced Saba (Musa Balbasiana) using hot-air dryer. *MATEC Web of Conferences*. 156: 02004.
- [38] Lenaerts, S., Van Der Borght, M., Callens, A. ve Van Campenhout, L. 2018. Suitability of microwave

- drying for mealworms (*Tenebrio molitor*) as alternative to freeze drying: Impact on nutritional quality and colour. *Food Chem*, 254 (2018), 129-136.
- [39] Liliana, S.-C., Diana, P. V.-M. ve Alfredo, A. A. 2015. Structural, physical, functional and nutraceutical changes of freeze-dried fruit. *African Journal of Biotechnology*, 14 (2015), 442-450.
- [40] Lin, L., Lei, F., Sun, D. W., Dong, Y., Yang, B. ve Zhao, M. 2012. Thermal inactivation kinetics of *Rabdosia serra* (Maxim.) Hara leaf peroxidase and polyphenol oxidase and comparative evaluation of drying methods on leaf phenolic profile and bioactivities. *Food Chem*, 134 (2012), 2021-2029.
- [41] Lv, H., Chen, X., Liu, X., Fang, C., Liu, H., Zhang, B. ve Fei, B. 2018. The vacuum-assisted microwave drying of round bamboos: Drying kinetics, color and mechanical property. *Materials Letters*, 223 (2018), 159-162.
- [42] Madhava Naidu, M., Vedashree, M., Satapathy, P., Khanum, H., Ramsamy, R. ve Hebbar, H. U. 2016. Effect of drying methods on the quality characteristics of dill (*Anethum graveolens*) greens. *Food Chem*, 192 (2016), 849-856.
- [43] Minea, V. 2015. Overview of heat-pump-assisted drying systems, part II: Data provided vs. results reported. *Drying Technology*, 33 (2015), 527-540.
- [44] Monteiro, R. L., Carciofi, B. A. M., Marsaioli, A. ve Laurindo, J. B. 2015. How to make a microwave vacuum dryer with turntable. *Journal of Food Engineering*, 166 (2015), 276-284.
- [45] Monteiro, R. L., Link, J. V., Tribuzi, G., Carciofi, B. A. M. ve Laurindo, J. B. 2018. Microwave vacuum drying and multi-flash drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*, 232 (2018), 1-10.
- [46] Morad, M. M., El-Shazly, M. A., Wasfy, K. I. ve El-Maghawry, H. A. M. 2017. Thermal analysis and performance evaluation of a solar tunnel greenhouse dryer for drying peppermint plants. *Renewable Energy*, 101 (2017), 992-1004.
- [47] Muliterno, M. M., Rodrigues, D., de Lima, F. S., Ida, E. I. ve Kurozawa, L. E. 2017. Conversion/degradation of isoflavones and color alterations during the drying of okara. *LWT - Food Science and Technology*, 75 (2017), 512-519.
- [48] Ndukwu, M. C., Dirioha, C., Abam, F. I. ve Ihediwa, V. E. 2017. Heat and mass transfer parameters in the drying of cocoyam slice. *Case Studies in Thermal Engineering*, 9 (2017), 62-71.
- [49] Ng, M. X., Tham, T. C., Gan, S. H., Chua, L. S., Aziz, R., Baba, M. R., Abdullah, L. C., Chin, N. L., Ong, S. P. ve Law, C. L. 2017. *Clinacanthus nutans* Lindau: Effects of drying methods on the bioactive compounds, colour characteristics and water activity. *Drying Technology*, (2017), 1-49.
- [50] Nguyen, T. K., Mondor, M. ve Ratti, C. 2018. Shrinkage of cellular food during air drying. *Journal of Food Engineering*, 230 (2018), 8-17.
- [51] Oikononopoulou, V. P. ve Krokida, M. K. 2012. Structural properties of dried potatoes, mushrooms, and strawberries as a function of freeze-drying pressure. *Drying Technology*, 30 (2012), 351-361.
- [52] Onwude, D. I., Hashim, N. ve Chen, G. 2016. Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops. *Trends in Food Science & Technology*, 57 (2016), 132-145.
- [53] Orikasa, T., Koide, S., Okamoto, S., Imaizumi, T., Muramatsu, Y., Takeda, J.-i., Shiina, T. ve Tagawa, A. 2014. Impacts of hot air and vacuum drying on the quality attributes of kiwifruit slices. *Journal of Food Engineering*, 125 (2014), 51-58.
- [54] Pal, U. S., Khan, M. K. ve Mohanty, S. N. 2008. Heat pump drying of green sweet pepper. *Drying Technology*, 26 (2008), 1584-1590.
- [55] Parniakov, O., Bals, O., Lebovka, N. ve Vorobiev, E. 2016. Pulsed electric field assisted vacuum freeze-drying of apple tissue. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 35 (2016), 52-57.
- [56] Pei, F., Yang, W., Ma, N., Fang, Y., Zhao, L., An, X., Xin, Z. ve Hu, Q. 2016. Effect of the two drying approaches on the volatile profiles of button mushroom (*Agaricus bisporus*) by headspace GC-MS and electronic nose. *LWT - Food Science and Technology*, 72 (2016), 343-350.
- [57] Peters, B. H., Staels, L., Rantanen, J., Molnar, F., De Beer, T., Lehto, V. P. ve Ketolainen, J. 2016. Effects of cooling rate in microscale and pilot scale freeze-drying - Variations in excipient polymorphs and protein secondary structure. *Eur J Pharm Sci*, 95 (2016), 72-81.
- [58] Prasertsan, S. ve Saen-saby, P. 1998. Heat pump drying of agricultural materials. *Drying Technology*, 16 (1998), 235-250.
- [59] Pu, H., Li, Z., Hui, J. ve Raghavan, G. S. V. 2016. Effect of relative humidity on microwave drying of carrot. *Journal of Food Engineering*, 190 (2016), 167-175.
- [60] Qiu, Y., Li, M., Hassanien, R. H. E., Wang, Y., Luo, X. ve Yu, Q. 2016. Performance and operation mode analysis of a heat recovery and thermal storage solar-assisted heat pump drying system. *Solar Energy*, 137 (2016), 225-235.
- [61] Rabha, D. K., Muthukumar, P. ve Somayaji, C. 2017. Energy and exergy analyses of the solar drying processes of ghost chilli pepper and ginger. *Renewable Energy*, 105 (2017), 764-773.
- [62] Reyes, A., Mahn, A. ve Huenulaf, P. 2011. Drying of apple slices in atmospheric and vacuum freeze dryer. *Drying Technology*, 29 (2011), 1076-1089.
- [63] Ricce, C., Rojas, M. L., Miano, A. C., Siche, R. ve Augusto, P. E. D. 2016. Ultrasound pre-treatment enhances the carrot drying and rehydration. *Food Research International*, 89 (2016), 701-708.
- [64] Rodriguez, O., Gomes, W., Rodrigues, S. ve Fernandes, F. A. 2017. Effect of acoustically assisted treatments on vitamins, antioxidant

- activity, organic acids and drying kinetics of pineapple. *Ultrason Sonochem*, 35 (2017), 92-102.
- [65] Saavedra, J., Córdova, A., Navarro, R., Díaz-Calderón, P., Fuentealba, C., Astudillo-Castro, C., Toledo, L., Enrione, J. ve Galvez, L. 2017. Industrial avocado waste: Functional compounds preservation by convective drying process. *Journal of Food Engineering*, 198 (2017), 81-90.
- [66] Sadıkoğlu, H. ve Özdemir, M. 2003. Dondurarak Kurutma Evreleri. *GIDA*, 28 (2003), 643-649.
- [67] Saha, B., Bucknall, M., Arcot, J. ve Driscoll, R. 2018. Derivation of two layer drying model with shrinkage and analysis of volatile depletion during drying of banana. *Journal of Food Engineering*, 226 (2018), 42-52.
- [68] Samadi, S. H., Ghobadian, B., Najafi, G. ve Motevali, A. 2014. Potential saving in energy using combined heat and power technology for drying agricultural products (banana slices). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13 (2014), 174-182.
- [69] Sette, P., Salvatori, D. ve Schebor, C. 2016. Physical and mechanical properties of raspberries subjected to osmotic dehydration and further dehydration by air- and freeze-drying. *Food and Bioproducts Processing*, 100 (2016), 156-171.
- [70] Silva, V., Costa, J. J., Figueiredo, A. R., Nunes, J., Nunes, C., Ribeiro, T. I. B. ve Pereira, B. 2016. Study of three-stage intermittent drying of pears considering shrinkage and variable diffusion coefficient. *Journal of Food Engineering*, 180 (2016), 77-86.
- [71] Song, X., Hu, H. ve Zhang, B. 2016. Drying characteristics of Chinese Yam (*Dioscorea opposita* Thunb.) by far-infrared radiation and heat pump. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, (2016),
- [72] Sonmete, M. H., Menges, H. O., Ertekin, C. ve Özcan, M. M. 2016. Mathematical modeling of thin layer drying of carrot slices by forced convection. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11 (2016), 629-638.
- [73] Söylemez, M. S. 2006. Optimum heat pump in drying systems with waste heat recovery. *Journal of Food Engineering*, 74 (2006), 292-298.
- [74] Szadzinska, J., Lechtanska, J., Kowalski, S. J. ve Stasiak, M. 2017. The effect of high power airborne ultrasound and microwaves on convective drying effectiveness and quality of green pepper. *Ultrason Sonochem*, 34 (2017), 531-539.
- [75] Şevik, S., Aktaş, M., Doğan, H. ve Koçak, S. 2013. Mushroom drying with solar assisted heat pump system. *Energy Conversion and Management*, 72 (2013), 171-178.
- [76] Talens, C., Arboleya, J. C., Castro-Giraldez, M. ve Fito, P. J. 2017. Effect of microwave power coupled with hot air drying on process efficiency and physico-chemical properties of a new dietary fibre ingredient obtained from orange peel. *LWT - Food Science and Technology*, 77 (2017), 110-118.
- [77] Tao, Y., Wang, P., Wang, Y., Kadam, S. U., Han, Y., Wang, J. ve Zhou, J. 2016. Power ultrasound as a pretreatment to convective drying of mulberry (*Morus alba* L.) leaves: Impact on drying kinetics and selected quality properties. *Ultrason Sonochem*, 31 (2016), 310-318.
- [78] Thirugnanasambandham, K. ve Sivakumar, V. 2016. Enhancement of shelf life of *Coriandrum sativum* leaves using vacuum drying process: Modeling and optimization. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 15 (2016), 195-201.
- [79] Tian, Y., Zhao, Y., Huang, J., Zeng, H. ve Zheng, B. 2016. Effects of different drying methods on the product quality and volatile compounds of whole shiitake mushrooms. *Food Chem*, 197 (2016), 714-722.
- [80] Torki-Harchegani, M., Ghanbarian, D., Maghsoodi, V. ve Moheb, A. 2016. Infrared thin layer drying of saffron (*Crocus sativus* L) stigmas: Mass transfer parameters and quality assessment. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, (2016),
- [81] Wang, J., Fang, X. M., Mujumdar, A. S., Qian, J. Y., Zhang, Q., Yang, X. H., Liu, Y. H., Gao, Z. J. ve Xiao, H. W. 2017. Effect of high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) on drying and quality of red pepper (*Capsicum annuum* L.). *Food Chem*, 220 (2017), 145-152.
- [82] Wang, J., Law, C.-L., Nema, P. K., Zhao, J.-H., Liu, Z.-L., Deng, L.-Z., Gao, Z.-J. ve Xiao, H.-W. 2018. Pulsed vacuum drying enhances drying kinetics and quality of lemon slices. *Journal of Food Engineering*, 224 (2018), 129-138.
- [83] Wang, R., Zhang, M. ve Mujumdar, A. S. 2010. Effects of vacuum and microwave freeze drying on microstructure and quality of potato slices. *Journal of Food Engineering*, 101 (2010), 131-139.
- [84] Wojdyło, A., Figiel, A., Legua, P., Lech, K., Carbonell-Barrachina, A. A. ve Hernandez, F. 2016. Chemical composition, antioxidant capacity, and sensory quality of dried jujube fruits as affected by cultivar and drying method. *Food Chem*, 207 (2016), 170-179.
- [85] Xin, Y., Zhang, M. ve Adhikari, B. 2014. The effects of ultrasound-assisted freezing on the freezing time and quality of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. botrytis L.) during immersion freezing. *International Journal of Refrigeration*, 41 (2014), 82-91.
- [86] Xu, B., Wang, L., Wei, B. ve Zeng, R. 2017. Low frequency ultrasound pretreatment of carrot slices: Effect on the moisture migration and quality attributes by intermediate-wave infrared radiation drying. *Ultrason Sonochem*, 40 (2017), 619-628.
- [87] Xu, W., Song, C., Li, Z., Song, F., Hu, S., Li, J., Zhu, G. ve Vijaya Raghavan, G. S. 2018. Temperature

gradient control during microwave combined with hot air drying. *Biosystems Engineering*, 169 (2018), 175-187.

- [88] Xu, Y., Zhang, M., Mujumdar, A. S., Duan, X. ve Jincan, S. 2006. A two-stage vacuum freeze and convective air drying method for strawberries. *Drying Technology*, 24 (2006), 1019-1023.
- [89] Zhou, L., Wang, X., Bi, J., Liu, X., Yi, J. ve Wu, X. 2017. Effect of different moisture equilibration process on the quality of apple chips dried by instant controlled pressure drop (dic)-assisted hot air drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42 (2017), e13316.
- [90] Zielinska, M. ve Markowski, M. 2016. The influence of microwave-assisted drying techniques on the rehydration behavior of blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.). *Food Chem*, 196 (2016), 1188-1196.
- [91] Zielinska, M., Zapotoczny, P., Alves-Filho, O., Eikevik, T. M. ve Blaszcak, W. 2013. A multi-stage combined heat pump and microwave vacuum drying of green peas. *Journal of Food Engineering*, 115 (2013), 347-356.