



Basınçlı hava kullanılan infrared ısıtıcılı kurutucuda kabuklu fındık kurutulması

Cengiz Özdemir Keleş*, Kamil Sacılık

Ankara Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Ankara
*Sorumlu yazar/corresponding author: kelescengiz@hotmail.com

Geliş/Received 18/06/2018

Kabul/Accepted 20/11/2018

ÖZET

Bu çalışmada, 2014 yılında fındık kurutma için tasarlanan infrared kurutucunun tasarımı geliştirilmiş ve 2015 hasat sezonunda tekrar deneyleri Giresun'da yapılmıştır. Fındığın yetiştiği bütün bölgeler gibi burası da aşırı nemlidir (13-18 g kg⁻¹ kuru hava). Dış ortam havasının bağıl nemi deneyler sırasında % 63-94 olarak kaydedilmiştir. Kompresör ve kurutucu setinden alınan kurutma havası ile fındığın nemli dış ortam havasından yalıtılarak kurutulması sağlanmıştır. Ürün kalitesini bozmadan en hızlı kurutmayı yapabilmek için fındıklar deney boyunca izin verilen en yüksek sıcaklıkta (50 °C) tutulmuştur. Kullanılan havanın kuru olması sayesinde hızlı nem alması sebebiyle 100 °C üzerindeki sıcaklıklardaki bile ürünün aşırı ısınmasına yol açmadığı görülmüştür. Basınçlı kuru hava kullanmanın psikrometrik analizleri yapılmış ve dış ortam havası ile karşılaştırılmıştır. İkinci serisi 2015 yılında yapılan deneyler 2014 yılındaki deneyleri doğrular nitelikte olup, özgül enerji tüketimi 1.82-2.76 kWh kg⁻¹ su (6.56 - 9.94 MJ kg⁻¹ su) olarak kaydedilmiştir. Kurutma sürelerinin 14-18 saat arasında değiştiği tespit edilmiş olup, aynı sıcaklıklarda daha çok hava kullanılması ile daha kısa sürede kurutmanın mümkün olacağı fakat enerji tüketiminin daha yüksek olacağı görülmüştür.

Anahtar Sözcükler:
Basınçlı hava kurutma
İnfrared kurutma
Fındık kurutma
Nemli havada kurutma

Drying of shelled hazelnut by an infrared heated dryer with compressed air

ABSTRACT

In this research, the design of infrared dryer designed for hazelnut drying in 2014, was improved and tested again in Giresun during the 2015 harvest season. It is also very humid like all regions where hazelnut is cultivated (13-18 g kg⁻¹ dry air). Ambient air relative humidity was recorded 63-94 % during experiments. Hazelnut was dried as isolated from ambient air and drying air was supplied by compressor-air dryer set. Hazelnuts were kept at maximum allowed temperature (50 °C) during the experiments to be able to reach fastest drying. Dry air didn't cause excess heating even over 100 °C temperatures since it continued to extract moisture from hazelnut. Compressed air was analyzed psychrometrically and compared with ambient air. Second series experiments (2015) confirmed 2014 experiments and Specific Energy was determined as 1.82-2.76 kWh kg⁻¹ water (6.56-9.94 MJ kg⁻¹ water). Drying time was recorded as 14-18 hours, however it was observed that it can be decreased by using more air and more energy.

Keywords:
Compressed air drying
Infrared drying
Hazelnut drying
Drying in humid environment

© OMU ANAJAS 2019

1. Giriş

Anavatamı Türkiye olan fındık (*Betulaceae Corylus*) bütün ılıman iklim kuşaklarında yetişebilen, geniş bir coğrafyaya yayılmış yağlı tohumlu sert kabuklu bir yemistir. Neredeyse dünya çapında geniş bir alanda yetişebilmekle beraber, ticari fındığın en iyi yetiştiği, en iyi kalitenin elde edildiği bölge ülkemizde Doğu Karadeniz bölgesinin kıyısı ile 600 m rakım arasında kalan kesimlerdir. Bununla birlikte, Karadeniz sahilinin

doğudan İstanbul'a kadar olan bölümünde, iç kesimlerde ve 600 m rakım üzerindeki bölgelerde de ticari olarak yetiştirilmektedir (Köksal, 2002).

Dünya fındık üretiminin yaklaşık % 60-80'i ülkemizde yapılmaktadır. Gıda olarak doğrudan tüketilmesinin yanı sıra, çikolata başta olmak üzere çeşitli gıda sanayi dallarında önemli bir girdi olan fındık, yağı, posası, kabuğu ve hatta yeşil kabuğu ile çok farklı sanayi dallarında değerlendirilen önemli bir üründür. Ülkemizde üretilen tarım ürünleri arasında ekonomik

değer ve ihracat oranı olarak başlarda yer almaktadır. Bu derece önemli bir ürünün depolanabilmesi için hasat sonrasında kurutulması şarttır. Aksi halde ürün depolarda çürüme ve küflenme yoluyla bozulabilmektedir. Bazı yıllarda, aşırı yağışların hasat dönemine gelmesiyle binlerce ton fındık kurutulmadan üretici elinde ziyan olabilmektedir. Önemli bir ihraç ürünü olan fındığın ticaretinde karşılaşılan en önemli sorunlardan birisi de aflatoksindir, fındığın kontrolsüz şartlarda kurutulması sırasında aflatoksin oluşması veya mevcut miktarın da artması gibi sakıncalar vardır. Tam kurutulmadan depolanan fındıkta küf mantarlarının artışa geçmesi ve ürünün tamamen bozulması da kaçınılmazdır. Depolama şartları üzerine yapılan çalışmalar fındık için ideal depolama şartlarının ürün nem içeriği ile ortam sıcaklık-nemi olduğunu göstermiştir (Savran, 2010). Depolanacak kabuklu fındığın iç neminin % 5-6 (y.b.) ve bu sırada kabuk neminin ise % 10-12 (y.b.) olması gerekmektedir (Anonim, 2012; Anonim, 2015). Depolama şartları kabuklu ve kabuksuz fındık için farklıdır. Kabuğun olmaması iç fındığın depolama süresini kısaltmakta ve depolama şartlarının daha dar limitler içinde olmasına yol açmaktadır. Kabuğun yokluğu ambalaj ile bir ölçüde telafi edilmeye çalışılmaktadır. Yapılan bir çalışmada vakum ambalaj veya modifiye ortam (karbondioksit veya azot) içine konmuş fındıkların 20-25 °C oda sıcaklığında ve % 60-65 bağıl nem ortamında kalitesinin muhafaza edilerek uzun süre saklanabildiği görülmüştür (Çetin ve ark., 2000). Kabuklu fındığın depolama koşulları iç fındığa göre daha geniştir. Uzun yıllara dayanan uygulama tecrübesi ve yapılmış çalışmalara göre 15-20 °C sıcaklık ve % 70 bağıl nem altında 2 yıl, 0-2 °C ve % 65 bağıl neme sahip soğutmalı depolarda 4 yıla kadar saklanabilmektedir. Her durumda da, kuru fındığın

saklandığı ortamdaki su aktivitesinin 0.6-0.7 olması gereklidir. Ortamın bağıl nemi, sıcaklıktan daha etkilidir. Düşük bağıl nem fındıkta hafiflemeye ve meyve kalitesinde düşmeye yol açar. Yüksek bağıl nemi ortamlar ise, fındıklarda küflenme, enzim faaliyeti, bayatlama, glikoz miktarında artış, pH değerinde düşme ve asitlenme görülmesine neden olur (Okuroğlu ve Örüng 2000). Depolama şartları ve maliyetlerinde gelişmeler oldukça sahaya yansımakta ve depodaki fındığın kalitesi iyileşmektedir. Ekonomik ve teknik olarak eskiden ulaşılamayan modifiye atmosfer ortamı (karbondioksit veya % 99 azot) artık mümkün olduğunca tercih edilmektedir. Modifiye ortam ürün kalitesini daha iyi muhafaza ederken, ortam sıcaklığında saklanan fındığın yağ asitleri ve doymuş yağ oranları hızla değişmektedir (Ghirardello ve ark. 2013).

Fındık kurutmadaki genel uygulama birçok tarım ürünü olduğu gibi sergi ile güneşe sererek kurutmaktır. Ancak Karadeniz bölgesi nemli bir havaya sahip olduğundan iklim koşulları buna fazla imkan vermemekte, kurutma işlemi günlerce sürebilmekte veya sağlıksız sonuçlar çıkabilmektedir. Fındık hasadının yapıldığı yörede sahilde öğle vakitlerinde genellikle 25-30 °C sıcaklıkta % 50-70 civarında nem görülmektedir. Gece saatlerinde sıcaklık düşmekte ve nem % 90 civarına gelmektedir. Hemen her gün zeminde çiylenme görülür. Yüksek kesimlerde ise daha serin ve daha nemli bir hava vardır. Bölge havası fındığın kurumasındaki en önemli engeldir. Fındık tarımının yapıldığı yöreleri temsilen seçili merkezlerde ve Ankara'da fındık hasat zamanı kaydedilen meteorolojik veriler Çizelge 1'de verilmiştir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, <https://www.mgm.gov.tr>).

Çizelge 1. Fındık tarımı yapılan bazı merkezlerde ve Ankara'da meteorolojik veriler

AĞUSTOS	Düzce	Samsun	Ordu	Giresun	Trabzon	Ankara
Günlük güneşlenme süreleri (saat)	8.4	8.1	6.0	3.0	5.6	10.8
Yağışlı gün sayısı	6.0	6.3	9.7	10.8	8.3	2.6
Aylık ortalama yağış (mm)	51.1	37.0	67.7	89.9	45.1	11.5
Ort. En Yüksek Sıcaklık (°C)	29.0	27.0	27.3	26.5	26.5	30.3
Ort. En Düşük Sıcaklık (°C)	16.8	19.6	19.9	20.2	20.3	15.9
EYLÜL	Düzce	Samsun	Ordu	Giresun	Trabzon	Ankara
Günlük güneşlenme süreleri (saat)	6.4	6.3	5.3	2.4	4.9	9.2
Yağışlı gün sayısı	7.6	9.5	11.8	12.5	10.6	4.0
Aylık ortalama yağış (mm)	51.0	53.8	79.9	128.3	78.5	17.8
Ort. En Yüksek Sıcaklık (°C)	25.8	23.9	24.2	23.5	23.6	25.9
Ort. En Düşük Sıcaklık (°C)	13.2	17.4	16.7	17.2	17.3	11.7

Karadeniz sahili boyunca Ağustos ayı gündüz süresi ortalama 13.8 saat, Eylülde ise 12.5 saattir. Çizelge 1'deki veriler dikkate alındığında Karadeniz sahilinde Giresun hariç gündüz süresinin ancak yarısında güneş görülebilmekte iken Ankara'da bu oran % 80 civarındadır. Giresun merkezde bu oran yaklaşık % 20 iken, fındık tarımı yapılan yüksek kesimlerde bu değer

de altındadır. Deneyler Giresun Organize Sanayi Bölgesinde bir fındık fabrikasında yapılmış olup, rakım 94 m'dir ve 2014 deneyleri sırasında sıcaklık 21.8-27.1 °C, bağıl nem ise % 71-94 olarak kaydedilmiş ve sabahları çiylenme olmuştur. 2015 deneylerinde ise 22.6-26.8 °C, bağıl nem ise % 63-85 olarak kaydedilmiştir. Deneylerin yapıldığı günlerde daha yüksek kesimlerde

sabahları yoğun sis görülmüştür. Nemin düşük olduğu Ankara karasal iklime sahip olup, gün içinde daha yüksek sıcaklıklar görülmektedir. Denize yakın kesimlerde gündüz sıcaklığı daha düşük olurken hava nemlidir ve kuruma daha yavaş olur; gece sıcaklığı karasal iklime göre daha yüksek olsa da, bağıl nem çiylenme derecesine kadar yükselmekte ve kuruma daha da zorlaşmakta veya geri nem alma bile mümkün olmaktadır. Denize yakın bölgelerde kurutmanın karasal iklime göre daha zor ve yavaş olacağı bu verilerden anlaşılmaktadır. Karadeniz bölgesi ise diğer tüm deniz kıyısı bölgelerden daha nemli ve daha serindir.

Fındığın kurutulması sırasında sıcaklığının 50 °C'yi geçmemesi gerekmektedir. Daha yüksek sıcaklıklar uygulandığında yağ asitlerinin yapısı değişmekte ve depolama süresi azalmaktadır. Mümkün olduğunca düşük sıcaklıkta kurutmak ürünün kimyasal yapısını muhafaza etmekte ve depolama süresini uzatmaktadır. İç fındıkla yapılmış bir çalışmada 35-40-45-50 °C'lerde kurutma yapılmış, kurutulmuş fındığın yağ asitleri ve ransimat değerleri ölçülmüştür. 45 °C'ye kadar tespit edilen değişimler büyük değilken, 50 °C limitler içinde kalsa da 45 °C ile arasında ciddi bir fark tespit edilmiştir (Özdemir ve ark., 2002). Düşük kurutma sıcaklığı ile daha kaliteli ürün elde edilirken kurutma süresi uzamaktadır. Isı pompası destekli bir kurutucuda fındık 50 °C'de 24 saate kurutulurken, 45 °C'de 27 saat, 40 °C'de 30 saate kurutulmuştur (Aktaş, 2007). Güneşe serme yoluyla yapılan kurutmada sıcaklık daha düşüktür, nispeten daha güneşli olan sahil kesimlerinde 2-3 günde, yüksek kesimlerde ise yağmur olmazsa 3-5 günde kurutma sağlanabilmektedir. Bu süre içinde sahildeki ortalama sıcaklık Ağustos ayında yaklaşık 23 °C, Eylül ayında ise 20 °C'dir. Bu veriler fındığın kurutma sıcaklığı ile kurutma süresi arasında kuvvetli bir ters ilişki olduğunu ortaya koymaktadır.

Fındıkla kıyaslandığında Antepfıstığı taş kabuk yapısı ve kalınlığı bakımından benzer ama kurutulması daha kolay bir üründür. Antepfıstığı ile yapılan ölçümlerde % 4 (y.b.) nem içeren kuru fıstıkların daha yüksek nem içeren fıstıklara göre ransimat, acılık ve lezzet bakımından daha iyi olduğu görülmüştür. İran'da yetiştirilen Ohadi tipi fıstıkla yapılan kurutma denemelerinde ortalama 26.5 °C'de ve % 18 bağıl nem içeren (mutlak nem yaklaşık 3.5 g kg⁻¹ hava) dış ortam havası çeşitli derecelere ısıtılmış ve farklı kurutucularla denemeler yapılmıştır. 40-45 °C'de yapılan kurutma 10 saat, 55 °C'de yapılan kurutma ise 8 saat sürmüştür (Kashani-Nejad ve ark., 2003). İran'da yapılan çalışma kurutma havasındaki nem içeriğinin kurutma süresi üzerinde ne kadar etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışmada da, Karadeniz bölgesinde İran şartlarından da daha kuru bir hava ile fındık kurutulması deneyleri incelenmiştir.

Bu çalışmada, havanın bağıl neminin yüksek olduğu bölgelerde dış ortam havasının kurutulacak ürüne, basınçlandırma yoluyla proses öncesi kurutularak uygulanması amaçlanmıştır. Fındık kurutma için 2014 yılında tasarlanan makina prototipi nemi alınmış

kompresör havası kullanarak, Karadeniz bölgesinde kuru bir hava ile kurutma yapmaktadır. Bu prototip 2015 testleri için geliştirilmiş, bilgisayar destekli otomatik kayıtlar alınarak psikrometrik analizlerle optimize edilmesi ve tasarım kriterlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada 2014 yılında test edilmiş makina prototipi kullanılmıştır (Keleş ve Saçılık, 2017). Aynı yöntem kullanılarak 2015 yılında yapılan kurutma deneylerinde bilgisayar ile bir saniyelik aralıklarla otomatik kayıt alınmış ve psikrometrik analizler yapılmıştır. Verilerin psikrometrik incelemesi ve analizi için PsychroGen 2.0, 2010 yazılımı; nem ve enerji hesaplamaları için kullanılan formüller ise bir ısı transferi kitabı ile ayrıca çevre ve enerji konularında faaliyet gösteren bir firmanın paylaşımına açık dokümanından alınmıştır (Holman, 2010; Vaisala, 2013).

Kurutma için kullanılan hava fındık fabrikası kompresöründen sağlanmış, 2015 deneylerinde kullanılan Çakıldak tipi fındıklar ise Fındık Araştırma Enstitüsü tarafından temin edilmiştir. Makina ve deney sırasında kurutulan fındıklar Şekil 1'de görülmektedir. Makinaya konulan fındıkların ön ısıtması infrared karbon filmler tarafından yapılmakta olup ısıtma (radyasyon) yoluyla ısıtmaktadır. Kabinin ve içindeki fındıkların sıcaklığı 50 °C'ye getirildikten sonra hava akımı başlatılmıştır. Bazı deneylerde infrared ısıtıcılarla beraber düşük debide sıcak hava da verilerek ön ısıtma hızlandırılmıştır. Kabine verilen basınçlı hava giriş kanalındaki ısıtıcı rezistans ile ısıtılmıştır. Buradaki sıcaklık bir termostat ile kontrol edilirken, kabini ısıtan karbon filmler kabin içindeki sensörün bağlı olduğu başka bir termostatla kontrol edilmiştir. Deneyler sırasında kompresör havasının miktarını tespit etmek amacıyla manometre-debitmetre-basınç transmitteri üçlüsü kullanılmış, giren havanın sıcaklık ve nemi sürekli ölçülmüştür. Ana kontrol parametresi fındığın yüzey sıcaklığı olarak kabul edilmiş ve infrared termometre ile 15 dakikalık aralıklarla ölçülmüştür. 50 °C ve üzerinde ölçümler görüldüğünde kabine giren havanın sıcaklık set değeri 5 °C, karbon filmler tarafından ısıtılan kabin içi sıcaklığı set değeri ise 2 °C düşürülmüştür. Deneylerde hava sıcaklığı 100 °C'den, kabin sıcaklığı ise 70 °C'den başlatılmıştır. Prosesin sonunda dışarı atılan nemli havanın sıcaklık ve bağıl nemi otomatik olarak sürekli kaydedilmiştir. Bu çalışmada sunulan psikrometrik analizler 2014 yılında yapılan dördüncü kurutma deneyine ve 2015 yılındaki üç kurutma deneyine dayanmaktadır. Bunlardan üçüncü test temel referans olarak alınmış, önceki iki testin verileri de kullanılmıştır. Üçüncü teste ait 30,595 satır veri seti mevcuttur. Ayrıca dış ortam sıcaklık ve nemi de bilgi ve kıyaslama için kaydedilmiştir.

Deneylerin başlangıcında ve sonunda alınan numunelerin nem içerikleri üç tekerrür üzerinden, deneylerin yapıldığı yerde kullanılan fırın ve hassas

terazi ile gravimetrik yöntemle göre belirlenmiştir. Numuneler yığının çeşitli yerlerinden, veya her bir çuvalın ortasından birer avuç alınarak bir kovada karıştırılmış, yeni karışımın da farklı yerlerinden birer avuç numune olarak belirlenmiştir. Örnekler 105 °C’de sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. Doğrulama amacıyla üç eşdeğer set numune de başka bir laboratuvara verilmiş ve nem tayininde bütün veriler dikkate alınmıştır.



Şekil 1. Test edilen fındıklar ve makina üzerinde infrared filmler

Kurutma testlerinde enerji ölçümleri deneysel olarak elektrik sayacıyla kaydedilmiş ve hava giriş-çıkış değerleri ile termodinamik hesaplamalar yapılarak iki ölçüm karşılaştırılmıştır. Elektrik sayacından geçen enerji üçe ayrılarak motor, kabin içi infrared ısıtıcılar ve hava hattındaki boru rezistans ısıtıcı tarafından kullanılmaktadır. Testin son yarım saatinde ısıtıcılar kapatılmış, elektrik sayacı üzerinden yapılan tüketim dikkate alınarak makinaya hareket veren motorun ne kadar enerji çektiği hesaplanmıştır. Fabrika verisi 1.1 kW olan motorun deneysel olarak belirlenen gücü 440 W olmuştur. Kurutma testi haricinde makina kabini ile dış ortam arasındaki fark 25 °C’ye ayarlanmış ve sadece infrared ısıtıcılar açık şekilde 90 dakika boyunca elektrik tüketimi izlenmiş, makinanın ısı kaybı 260 W olarak belirlenmiştir. Kurutma süresinin 10-14 saat olacağı varsayılırsa yalıtıma bağlı ısı kaybının yaklaşık 3 kWh olacağı görülmektedir. Daha iyi yalıtımla bunu azaltmak mümkündür. Testin bitişi ile başlangıcı arasındaki sıcaklık farkı 15 °C kabul edilerek makinanın yaklaşık 100 kg demir aksamını ve 200 kg fındığı ısıtmak için kullanılan enerji formül (1) ile hesaplanmıştır (Keleş,2018):

$$E_m = \Delta T (200.c_f + 100.c_{fe}) = 15 (200 \times 1.76 + 100 \times 0.48) = 5,985 \text{ kJ} \quad (1)$$

c_f fındığın özısısı (kJ kg⁻¹ K⁻¹),
 c_{fe} demirin özısısıdır (kJ kg⁻¹ K⁻¹).

Çıkış ve giriş havaları arasındaki entalpi farkı birim havayı ısıtmak ve alınan suyu buharlaştırmak için kullanılan enerjiyi verir. Çıkış ve giriş havalarının entalpi farkı birim havayı ısıtmak ve alınan suyu buharlaştırmak için kullanılan enerji olup formül (2) ile hesaplanmıştır.

$$E_h = \sum \dot{M}.\Delta h / 3600 \quad (2)$$

Δh çıkış giriş arasındaki entalpi farkı (kJ kg⁻¹), \dot{M} ise anlık kütleli hava debisidir (kg h⁻¹).

3. Bulgular ve Tartışma

3.1 Deneysel sonuçları

Testin yapıldığı 11:45:00 ile 20:30:00 aralığı dikkate alındığında, elektrik sayacı ölçümleri arasındaki fark 21.49 kWh olmuştur. Bu süre içinde motorun kullandığı enerji 3.85 kWh ve ısı kaybı ise 2.27 kWh olup, kalan 15.37 kWh (55332 kJ) enerji giren hava ile makina ve fındık kütlelerini ısıtma için kullanılmıştır. Formül (1) ile bu enerji 5985 kJ olarak hesaplanmıştır. Kalan 49347 kJ enerji havaya transfer edilen enerjidir. Çıkış ve giriş havalarının entalpi değerleri üzerinden hesaplama yapıldığında bulunan değer 51922 kJ olup, iki hesap arasında % 4.95 fark vardır, makineden olası hava kaçakları ve çalışılan ürün dikkate alındığında kabul edilebilir bir fark olduğu görülmüştür. Enerji ve verimlilik gibi hesaplamalarda somut ölçüme dayandığı için elektrik sayacının verileri esas alınmıştır. 24 Ağustos 2015 tarihli üçüncü test boyunca kullanılan toplam hava miktarı 569 kg (482.26 m³) olarak ölçülmüştür. Katalog değerleri kullanılarak bu kadar havayı elde etmek için gerekli enerji miktarı 8.04 kWh olarak kabul edilmiştir (Anonim, 2016). Hava üretimi için yapılan bu hesap 2014 testi için tekrarlanarak, daha önce beyan edilenden daha yüksek bir enerji kullanımı dikkate alınmıştır. 2014 testinde kullanılan 894 m³ hava için kullanılan enerji 14.90 kWh olarak hesaba alınmıştır. 2015 deneylerinin sonuçları ile 2014 sonuçları Çizelge 2’de kıyaslanmıştır.

Bu iki test arasında farklar vardır. 2015 testi tam kurumayı sağlamış değildir, bu nedenle hesaplanan 1.82 kWh kg⁻¹ su özgül enerji kullanımının olması gerekenden biraz daha düşük olduğu açıktır. 2014 testi ise aşırı kurutmaya ulaşmış olup, enerji kullanımı olması gerekenden yüksek olmuştur. Yüksek olmasının bir sebebi de kurutulan fındığa göre az havanın fazla ısıtılmasıdır, test boyunca kullanılan hava debisi ortalama 40 m³ h⁻¹ iken, 2015 testinde bu miktar 57 m³ h⁻¹ civarındadır. Testin sonuna doğru dışarı atılan hava 50 °C civarında olmuştur. Dışarı atılan havanın ortam

sıcaklığına göre fazla yüksek olması enerji israfı anlamına da gelmektedir. İhtiyat payı bırakılarak iki sonucun arasındaki 2.5 kWh kg⁻¹ su değeri yapılacak tasarımlar için esas alınabilecek bir değerdir.

Çizelge 2. Verimlilik ve tasarım kriterleri bakımından 2014 ve 2015'in son testlerinin kıyaslanması

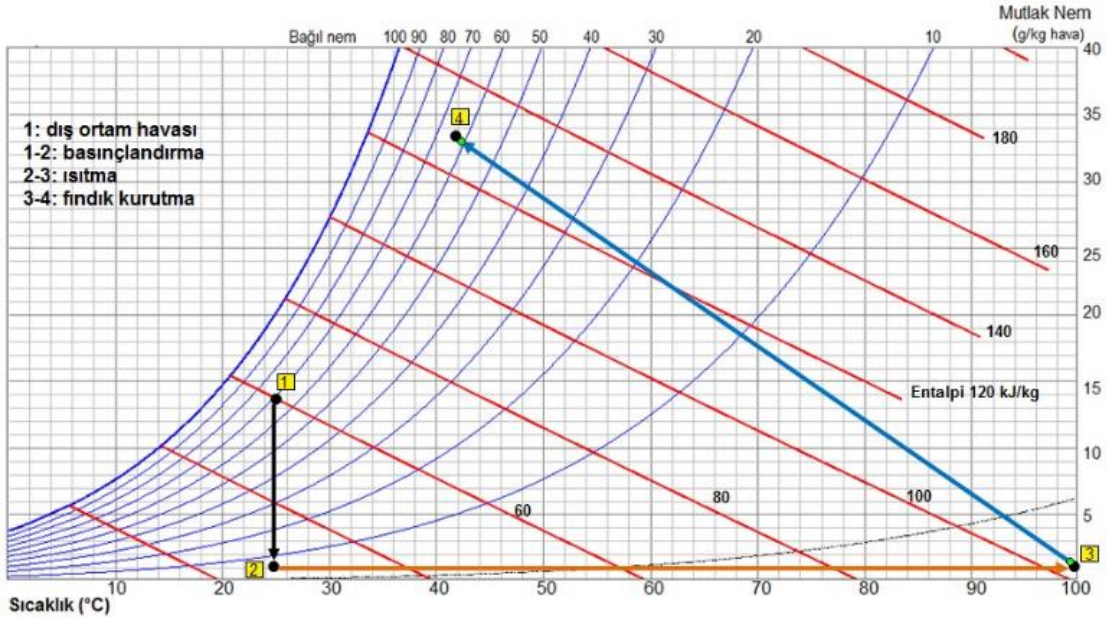
	2014	2015
Toplam enerji (kWh)	58.51	29.53
Toplam hava (m ³)	894	482.26
Fındıktan alınan su (kg)	21.2	16.2
Özgül hava (m ³ hava kg ⁻¹ su)	42.17	29.77
Özgül enerji (kWh kg ⁻¹ su)	2.76	1.82

3.2 Deney şartlarının tanımlanması ve fındığın sıcaklığı

Kaynak olarak alınan çalışmalarda deney şartları genellikle hava sıcaklığı ile hava debisi veya hızı olarak tanımlanmıştır. Kurutma deneylerinde en öncelikli deney şartı, deneylerin yapıldığı yerin veya yörenin meteorolojik şartları olmalıdır. Temel veri deneyin yapıldığı an veya süre içindeki sıcaklık ve bağıl nem değerleridir, termodinamik hesaplamalar üzerinde az da olsa atmosferik basınç verisi de etkilidir. Kurutma

sıcaklığın yanı sıra bu havanın taşıdığı bağıl nem veya mutlak nem de bilinmelidir. Kurutma havasının hızından bahsedilmekte olup, bu bilgi tek bir fındığın kuruma davranışının belirlenmesinde anlamlı olabilir. Fındığın sergi halinde veya akışkan yatak içinde olması halleri dikkate alınır, birim fındık başına hava debisinin bilinmesi de önemlidir. Hava hızı debi bilgisi ile hesaplanabilir. Kurutma havası nem aldıkça sıcaklığı düşer, nem içeriği artar. Psikrometrik hesap yapılabilmesi için aynı debideki havanın yeni sıcaklık ve bağıl/mutlak nem ölçümü yapılmalıdır.

Bilinmesi gereken önemli bir parametre de, kurutma sırasında fındığın sıcaklığıdır. Fındık sıcaklığı, kurutma havasının sıcaklığı ile aynı değildir, her zaman kurutma havasından daha düşüktür. Yapılan çalışmalarda 40, 45 veya 50 °C gibi sınır değerler tanımlanmaktadır. İdeal sıcaklık, fındığın kalitesini olumsuz etkilemeden en hızlı kurutmayı sağlayan değer olarak tanımlanabilir. Hasat edilmiş biyolojik bir madde olan fındık hiç sıcaklık uygulanmasa bile, yarı canlı halde iken içerdiği kimyasalların değerleri zamanla değişecektir. Bu değerlerin sabit kalma şansı yoktur. Bu etkenleri dikkate alan bir çalışmaya göre iç fındığa uygulanabilecek güvenli en yüksek sıcaklık 45 °C'dir. Daha yüksek sıcaklıklar kaliteyi belirleyen bazı kimyasalların değişimini daha fazla etkilemektedir (Özdemir ve ark., 2002).



amacıyla fındığa farklı sıcaklıklarda hava üflenmektedir,

Şekil 2. Seçili ana ait havanın psikrometrik değişimi (24.08.2015; 17:18:19)

Yararlanılan çalışmalarda, kabuklu fındığa uygulanan kurutma havası 30, 35, 40, 45, 50 °C sıcaklığa ayarlanarak ölçümler yapılmıştır. Kurutma havasının sıcaklığı fındığın sıcaklığına eşit değildir. Kurutmanın başlarında hızlı nem tahliyesi yapılırken arada büyük fark vardır, örneğin bu çalışma kapsamında 2015 yılının son testinin seçili bir anında (24.08.2015; 17:18:19) dış ortam 25 °C'de % 69 bağıl nem içerirken giren havanın

sıcaklığı 100 °C'ye sabitlenmiş ve aynı anda çıkan havanın sıcaklığı 41.6 °C, bağıl nemi % 63.4 ve kabukta görülen sıcaklık değerleri 45-48 °C olarak kaydedilmiştir. Bu sırada fındık içinin sıcaklığı bu değerden daha düşüktür. Bu sıradaki prosesin izlediği yol Şekil 2'de psikrometrik şema üzerinde gösterilmiştir. 8 saatin sonunda kuruma hala devam ederken, giriş sıcaklığı 100 °C'ye ayarlanmış, çıkan hava sıcaklığı 43.1

°C ve kabukta görülen sıcaklık yine 45-48 °C olarak kaydedilmiştir. Test süresince sifıra yakın nem içeren hava kullanıldığı için, fındıktan havaya nem geçişi diğer metotlara göre hızlı olmakta ve yoğun buharlaşma sebebiyle fındık ısınmaya fırsat bulamamaktadır. Bu nedenle, kurutma havası sıcaklığı 50 °C'den yukarı olabilir, önemli olan fındığın iç sıcaklığının bu değeri geçmemesidir. Kuruma ilerledikçe hava sıcaklığının düşürülmesi gereklidir, çünkü nem transferinin yavaşlaması ile birlikte fındık ile kurutma havası arasındaki sıcaklık farkı azalır. 2014 yılının son testinde uygulanmış olan son hava sıcaklığı 67 °C'dir, bu sırada istenenden daha fazla kurumuş olan fındığın kabuğunda tespit edilen sıcaklık 49 °C ve çıkış havası da 50 °C'ye varmış durumdadır. Fındık içinin sıcaklığı ölçülememişse de hala 50 °C'den düşük olacağı açıktır.

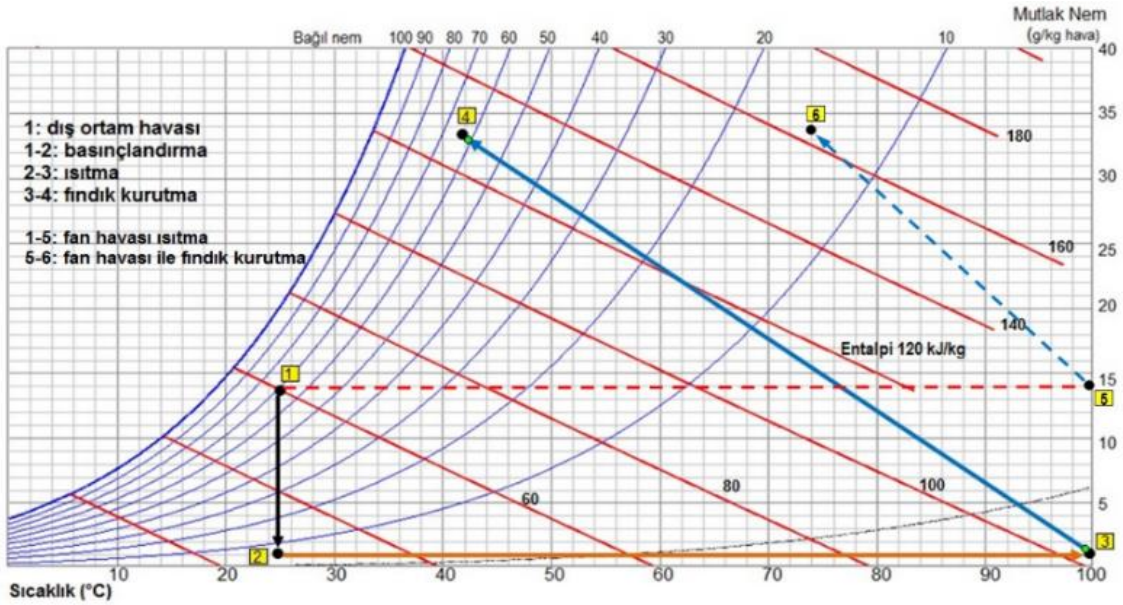
3.3 Basınçlı havanın psikrometrik farkı

Deneylerdeki basınçlı hava 100 °C'ye kadar ısıtılıp kabine verilmiş ve ayrıca infrared karbon filmler bu havayı ısıtmaya devam etmiştir. Şekil 2'deki nem alma çizgisi, sabit entalpi çizgileri ve çıkış havası (4 noktası) incelendiğinde kullanılan havanın aslında 120°C'nin de üzerinde olduğu görülür. Kompresör kullanmak yerine, daha ucuz olan fan ile hava sağlanması ve bu havanın aynı ısıtmadan geçirilip kabine verilmesi de bir seçenek olabilir. Şekil 2'de incelenen psikrometrik proses sırasında kompresör havası yaklaşık 1 g kg⁻¹ hava kadar nem içermektedir. Aynı anda dış ortam havasında ise yaklaşık 14 g kg⁻¹ hava kadar nem bulunmaktadır. Fick tarafından formüle edilen difüzyon kanununa göre difüzyon hızı iki ortam arasındaki konsantrasyon farkı ile orantılıdır:

$$J = -D \cdot d\phi / dx \quad (3)$$

J, difüzyon akışı (mol m⁻² s⁻¹);
D, difüzyon katsayısı (m² s⁻¹);
 ϕ , konsantrasyon (mol m⁻³)

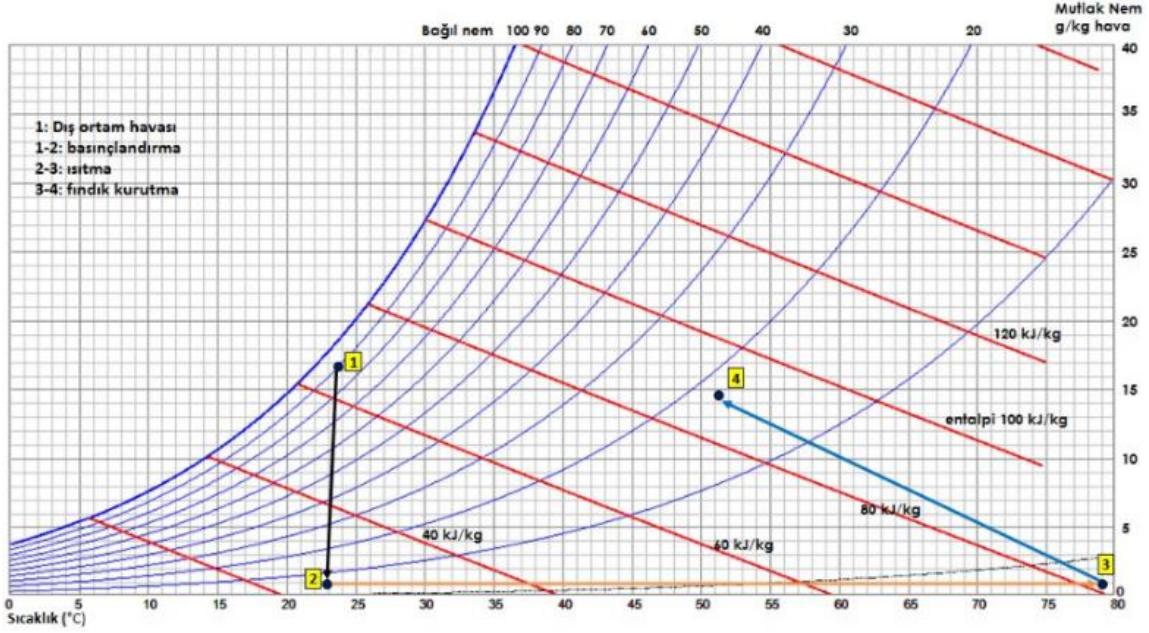
Aynı makinada, aynı geometri ile, basınçlı hava ve fan havası kullanma seçenekleri dikkate alındığında difüzyon akışı konsantrasyon farkı ile doğru orantılı olur. Her iki havanın nem konsantrasyonları arasında büyük fark vardır. Bu nedenle, basınçlı hava ile daha büyük difüzyon akışının olacağı muhakkak olup, fan havası kullanılması halinde çıkış havası daha büyük miktarda nem taşıyor olacaktır. Her iki havanın da çıkışta eşit nem taşıdığı varsayılırsa, prosesin seçili anında (24.08.2015; 17:18:19) basınçlı hava 32.5 g kg⁻¹ hava kadar nem alırken, bu miktar fan havası seçeneğinde yaklaşık 20 g kg⁻¹ hava kadar olabilir. Ancak esas fark bu değildir, basınçlı hava kabin girişinde 100 °C'ye kadar ısıtıldığında entalpisi 102.4 kJ kg⁻¹ seviyesine gelmiştir, içeri giren havaya karbon filmler tarafından eklenen entalpi artışı ise 26.4 kJ kg⁻¹ olmuştur. Fan havası da 100 °C'ye kadar ısıtılıp kabine verildikten sonra entalpisi bu kadar artacaktır. Şekil 3 üzerinde basınçlı hava ve fan havası seçenekleri psikrometrik olarak gösterilmiştir. Basınçlı hava süreci (1→2→3→4) olarak, dış ortam havasını kullanan fanlı proses ise (1→5→6) olarak gösterilmiştir. Başlangıç ve bitiş entalpi ve nem seviyeleri dikkate alınarak yapılan şematik gösterimle, dış ortam havasının aynı derecede ısıtılması halinde çıkış havasının yaklaşık 74 °C olacağı görülmektedir. Fındığın bu sıcaklığa çıkarılması halinde tamamen bozulması kaçınılmazdır. Basınçlı hava ile nemli hava, kuru termometre üzerinde eşit olabilir ancak psikrometrik olarak eşit değildir.



Şekil 3. Basınçlı hava ile dış ortam havası proseslerinin psikrometrik gösterimi

Basınçlı havanın sağladığı bir başka avantaj da, kuruma noktası yakalandığında bile hızlı kurutma sağlayabilmesidir. 2014 yılında yapılan son deney 22.5 saat sürdürülerek aşırı kurutma test edilmiştir. Ölçümlere göre yaklaşık 18. saat sonunda (20.08.2014, saat 08:00) fındıkta ortalama % 8 (y.b.) nemin altına düşülmüştür.

Kurutma havasının bu sıradaki değişimi Şekil 4'de psikrometrik şema üzerinde gösterilmiştir. Şemanın verdiği en bariz bilgi dışarı atılan nemli havanın dış ortam havasından daha az nem taşımıştır. Kurutma havasının bu andaki sıcaklığı 79 °C olup, fındıkların kabuk sıcaklığı 50-52 °C civarındadır.



Şekil 4. Kurumunun tespit edildiği andaki hava prosesinin psikrometrik gösterimi

3.4 Özgül enerji

İki yılda yapılan 7 deneyin sonucuna bakılarak özgül enerji tüketimi yaklaşık 2.5 kWh kg⁻¹ su (9 MJ kg⁻¹ su) olarak belirlenmiştir. Fındık birçok tarım ve gıda ürünü ile kıyaslandığında nem almanın daha zor olduğu bir üründür. Yaş fındığın ortalama nem içeriği yaklaşık % 20 seviyesinde olup, ortalama % 8'e düşürülmektedir. Oysa çoğu tarım ürünü başlangıç nemi % 85-90 (y.b.) olup, kuru ürün nem hedefi % 15-20 civarındadır. Kuru kayısı, incir ve üzüm gibi ürünlerin nem içeriği yaş fındık kadardır. Sıcak hava ve FIR (Far infrared radiation) enerji ile Longan meyvesi kurutma deneylerinde beyan edilen özgül enerji 26.73-45.12 MJ kg⁻¹ su olmuştur. Longan meyvesinin başlangıç nemi % 84-86 (y.b.), nihai nemi ise % 18'dir (Nathakaranakule ve ark., 2010). Longan meyvesine yapısal olarak benzeyen Fejoa meyvesi farklı tip infrared ısıtıcılarla kurutulmuş, yaklaşık aynı nem değerleri arasında yapılan kurutma sonucu özgül enerji 6.77-12.47 MJ kg⁻¹ su aralığında gerçekleşmiştir. Dilimli meyvelerle yapılması sebebiyle daha az enerji ile kurutma sağlanmıştır (Bozbıyık, 2013). Yine dilimli havuç ve patates sıcak hava ve MIR enerji kombinasyonları ile kurutulmuş, özgül enerji 6.04-17.17 MJ kg⁻¹ su aralığında gerçekleşmiştir (Umesh-Hebbur ve ark., 2004). Başka bir çalışmada NIR ve MIR bandında infrared lamba kullanılarak, farklı sıcaklık, lamba gücü

ve 1 m s⁻¹ hava akımı ile mantının % 35 (y.b.) olan başlangıç nemi, % 12'ye düşürülmüştür. Manti fındığa göre daha kolay nem verebilen bir üründür. Bu nedenle kurutma süreleri 66-162 dakika aralığında gerçekleşirken, özgül enerji 36.91 – 77.59 MJ kg⁻¹ su aralığında gerçekleşmiştir (Arslan, 2012). Kıyaslanan ürünlerin yapısı ve başlangıç-bitiş nem içerikleri dikkate alındığında fındık gibi taş kabuklu ve yağlı bir tohumdan 9 MJ kg⁻¹ su enerji ile buharlaştırma yapmak başarılı bir sonuçtur.

4. Sonuç

- Basınçlı havanın yığın halindeki ürüne içeriden uygulanabilmesi hem hava-ürün temasını arttırmakta, hem de dışarı çıkan hava mutlaka ürünle temas etmiş olacağı için enerji kaybını azaltmaktadır.
- Basınçlı hava 100 °C'den fazla ısıtılsa bile yüksek buharlaşma hızı sebebiyle ürünün aşırı ısınmasına izin vermemektedir.
- 9 MJ kg⁻¹ su özgül enerji tüketimi yaş meyve ve sebze ile yapılan pek çok kurutmaya göre daha düşüktür. Makina tasarımı ve metod bu konuda başarılıdır. Geometri ve ayarların optimize edilmesi ile daha iyi sonuçlar elde etmek mümkün olacaktır. Aynı makina tasarımı, aynı metod ile başka kabuklu yemişler için de aynı başarı ile kullanılabilir.

- 30 kg hava kg-1 su ve 2.5 kWh kg-1 su değerleri yapılacak tasarımlarda temel kriter olarak alınacaktır.
- Basınçlı kuru havanın nem içeriğinin çok düşük olması sebebiyle nemli ortamlarda kurutma yapılması veya sıfır nem hedefi ile yapılan kurutmalarda kullanılması iyi bir seçenek olarak görünmektedir.

Teşekkürler

Bu çalışma Kaynaklar kısmında gösterilmiş olan "Basınçlı Hava Kullanılan İnfrared Isıtıcı Kurutucuda Kabuklu Fındık Kurutulması" konulu doktora tezinden kısmen alınmıştır.

Kaynaklar

- Aktaş, M., 2007. Isı Pompası Destekli Fındık Kurutma Fırınının Tasarımı, İmalatı Ve Deneysel İncelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Ün. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, 116, Ankara
- Anonim, 2015. TS 3074 - Kabuklu Fındık Standardı (2015)
- Anonim, 2012. TS 3075 - İç Fındık Standardı (2012)
- Anonim, 2016. Genel ürün kataloğu 2016, Tamsan Kompresörleri, s 6-7
- Arslan, N., 2012. İnfrared kurutma yönteminin kurutulmuş mantı kalitesi üzerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, 51, Çanakkale
- Bozbyık, N.K., 2013. Fejoyanın (*acca sellowiana*) fiziksel ve kimyasal özelliklerinin araştırılması ve infrared kurutma yöntemi ile kurutma parametrelerinin belirlenmesi. Doktora Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, 101, Çanakkale
- Çetin, Ö., Nazlı, B., Bostan, K., Alperden, İ., 2000. Depolamanın Çiğ Fındığın Kalitesi Üzerine Etkisi. İstanbul Üniv. Vet. Fak. Derg. 26(2), 413-419
- Ghirardello, D., Contessa, C., Valentini, N., Zeppa, G., Rolle, L., Gerbi, V., Botta, R., 2013. Effect of storage conditions on chemical and physical characteristics of hazelnut (*Corylus avellana L.*). Postharvest Biology and Technology 81: 37-43
- Holman, J.P., 2010. Heat Transfer, 10th Edition, s 587-599
- Kashani-Nejad, M., Tabil, L.G., Mortazavi, A., Safe-Kordi, A., 2003. Effect of drying methods on quality of pistachio nuts. Drying Technology 21 (5): 821-838.
- Keleş, C.Ö., 2018. Basınçlı hava kullanılan infrared ısıtıcı kurutucuda kabuklu fındık kurutulması. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği ABD, 124.
- Keleş, C. Ö., Saçılık, K., 2017. İnfrared ısıtım fındık kurutma makinası tasarımı. Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi, 32: 197-205.
- Köksal, İ., 2002. Türk Fındık Çeşitleri. Fındık Tanıtım Grubu Yayını, 136, Giresun.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü. <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=GIRESUN>, (erişim tarihi 21.05.2018).
- Nathakaranakule, A., Jaiboon, P., Soponronnarit, S., 2010. Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit. Journal of Food Engineering, 100: 662-668
- Okuroğlu, M., Örüng, İ., 2000. Karadeniz Bölgesinde Fındık Depolama Yapılarının Planlama Kriterlerinin Belirlenmesi. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fak. Derg. 31(1): 43-49
- Özdemir, M., Yıldız, M., Gürcan Ş.T., 2002. Mekanik kurutmada hava sıcaklığının önemli Türk fındık çeşitlerinden Tombul'un kalitesine etkisi. Gıda Dergisi 27(1): 35-39
- PsychroGen 2.0, 2010. Psychrometric calculations software, Airquest Limited.
- Savran, E., 2010. Fındıkta Hasat ve Harman Sonrası İşlemler. Fındık Araştırma Enstitüsü yayını. <http://arastirma.tarim.gov.tr/findik/Sayfalar/Detay.aspx?SayfaId=34>
- Umesh-Hebbbar, H.; Vishwanathan, H.K; Ramesh, M.N., 2004. Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. Journal of Food Engineering, 65: 557-563.
- Vaisala, 2013. Humidity Conversion Formulas, Vaisala Oyj Şirket Dokümanı