

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LEVREK BALIĞININ FARKLI YÖNTEMLERLE KURUTMA
KİNETİĞİNİN İNCELENMESİ

Bahtınur Sezin ALKAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Kimya Mühendisliği Programı

Danışman

Doç. Dr. Nurcan TUĞRUL

Temmuz, 2019

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LEVREK BALIĞININ FARKLI YÖNTEMLERLE KURUTMA
KİNETİĞİNİN İNCELENMESİ

Bahtınur Sezin ALKAN tarafından hazırlanan tez çalışması 19/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Nurcan TUĞRUL

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Nurcan TUĞRUL, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Saadet PABUÇCUOĞLU, Üye
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Doç. Dr. Azmi Seyhun KIPÇAK, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Nurcan TUĞRUL, sorumluluğunda tarafımda hazırlanan Levrek Balığının Farklı Yöntemlerle Kurutma Kinetiğinin İncelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Bahtınur Sezin ALKAN

İmza

TEŐEKKÜR

Lisansüstü tez konumun belirlenmesi ve sonraki tüm hazırlık sürecimde hoşgörüsü, bilgi ve tecrübesi ile her zaman yardımcı olan saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Nurcan TUĞRUL ve her fırsatta değerli zamanını ayırarak çalışmam süresince yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer hocam Doç. Dr. Azmi Seyhun KIPÇAK' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bahtınur Sezin ALKAN



| | |
|--|-------------|
| SİMGE LİSTESİ | vii |
| KISALTMA LİSTESİ | viii |
| ŞEKİL LİSTESİ | ix |
| TABLO LİSTESİ | xi |
| ÖZET | xii |
| ABSTRACT | xiii |
| 1 Giriş | 1 |
| 1.1 Literatür Özeti | 1 |
| 1.1.1 Literatür Çalışmaları..... | 1 |
| 1.2 Tezin Amacı | 2 |
| 1.3 Hipotez | 3 |
| 2 Levrek | 4 |
| 2.1 Levrek Üretimi | 4 |
| 2.1.1 Levrek Balığı Besin Değerleri..... | 5 |
| 2.2 Kurutulmuş Balık | 5 |
| 3 Kurutma | 7 |
| 3.1 Kurutmaya Giriş..... | 7 |
| 3.1 Kurutma Mekanizması | 8 |
| 3.2 Ürün Nem Miktarı ve Nem Oranı Hesabı | 12 |
| 3.3 Su Aktivitesi..... | 13 |
| 3.4 Sorpsiyon İzotermi | 14 |
| 3.5 Kuruma Esnasında Görülen Evreler | 15 |
| 3.6 Kuruma Hızına Etki Eden Faktörler..... | 17 |
| 3.7 Kurutma Yöntemleri ve Kurutucu Tipleri | 18 |
| 3.7.1 Güneşte Kurutma | 20 |
| 3.7.2 Akışkan Yataklı Kurutma | 21 |

| | |
|--|-----------|
| 3.7.3 Tünel Tipi Kurutucular | 23 |
| 3.7.4 Sprey Kurutucular..... | 23 |
| 3.7.5. Dondurarak Kurutma | 24 |
| 3.7.6 Vakumlu Kurutma..... | 26 |
| 3.7.7 Mikrodalga Kurutma..... | 28 |
| 4 Deneysel Çalışma | 32 |
| 4.1 Materyal..... | 32 |
| 4.2 Kullanılan Cihazlar..... | 32 |
| 4.2.1 Hassas Terazi..... | 32 |
| 4.2.2 Mikrodalga Fırın | 33 |
| 4.2.3 Vakum Etüvü..... | 33 |
| 4.3 Metot..... | 34 |
| 4.3.1 Nem Tayini..... | 34 |
| 4.3.2 Kurutma İşlemine Hazırlık | 34 |
| 4.3.3 Kurutma İşlemleri..... | 34 |
| 4.3.3.1 Mikrodalga Fırında Kurutma..... | 34 |
| 4.3.3.2 Vakum Etüvünde Kurutma..... | 35 |
| 4.4 Matematiksel Modelleme | 37 |
| 4.4.1 Regresyon analizi | 38 |
| 5 Deneysel Sonuçlar | 41 |
| 5.1 Kurutma Eğrileri..... | 41 |
| 5.1.1 Nem İçeriği..... | 41 |
| 5.1.2 Kurutma Hızı | 43 |
| 5.1.3 Efektif Difüzyon Katsayıları | 45 |
| 5.1.4 Aktivasyon Enerjileri | 48 |
| 5.1.5 Matematiksel Modelleme | 49 |
| 6 Sonuçlar ve Öneriler | 56 |
| Kaynakça..... | 58 |
| Tezden Üretilmiş Yayınlar | 64 |

SİMGE LİSTESİ

| | |
|------------------|--|
| a_w | Su aktivitesi |
| D_{eff} | Efektif difüzyon katsayısı (m^2/s) |
| E_a | Aktivasyon enerjisi ($kJ/mol, kw/kg$) |
| L | Dilim yarı kalınlığı (m) |
| M | Nem içeriği ($kg su/kg$ kuru madde) |
| m_d | Kuru madde miktarı (kg) |
| M_e | Kurutma koşullarındaki havanın denge su miktarı ($kg su/kg$ kuru madde) |
| M_0 | $t=0$ anındaki nem içeriği ($kg su/kg$ kuru madde) |
| M_t | t anındaki nem içeriği ($kg su/kg$ kuru madde) |
| $M_{t+\Delta t}$ | $t+\Delta t$ anındaki nem içeriği ($kg su/kg$ kuru madde) |
| m_w | Su miktarı (kg) |
| MR | Nem oranı |
| N | DeneySEL veri sayısı |
| n | Kullanılan kurutma modelindeki katsayısı |
| R | Üniversal gaz sabiti ($Kj/(mol. K)$) |
| R^2 | Regresyon katsayıları |
| T | Kurutma sıcaklığı ($^{\circ}C$) |
| W | Mikrodalga gücü (Watt) |
| t | Zaman (dak) |
| χ^2 | khi-kare değeri |

KISALTMA LİSTESİ

| | |
|-------|-------------------------|
| MRexp | Deneysel nem oranı |
| MRpre | Tahmin edilen nem oranı |
| RMSE | Tahmini standart hatası |



ŞEKİL LİSTESİ

| | | |
|-------------------|--|----|
| Şekil 2.1 | Kültür Balıkçılığı ile Balık Üretimi | 4 |
| Şekil 2.2 | Balık Tütsüleme İşlemi..... | 6 |
| Şekil 3.1 | Geleneksel Yöntem ile Kurutulmuş Balıklar | 8 |
| Şekil 3.2 | Kuruma Esnasında Gerçekleşen Isı ve Kütle Aktarımının Şematik Gösterimi. | 9 |
| Şekil 3.3 | Su Aktivitesi ile Gıdadaki Bozulma Reaksiyonları Arasındaki İlişki..... | 13 |
| Şekil 3.4 | Tipik Bir Gıda Ürünü için Sorpsiyon İzotermi..... | 14 |
| Şekil 3.5 | Kuruma Eğrisi | 16 |
| Şekil 3.6 | Güneşte Kurutulmuş Balıklar | 20 |
| Şekil 3.7 | Kurutma İşleminde Güneş Enerjisinin Kullanılma Yöntemleri | 21 |
| Şekil 3.8 | Tipik Bir Akışkan Yataklı Kurutucu | 22 |
| Şekil 3.9 | Püskürtmeli Kurutucunun Şematik Gösterimi..... | 23 |
| Şekil 3.10 | Denge Faz Diagramı | 25 |
| Şekil 3.11 | Pilot Ölçekli Vakumlu Kurutucu..... | 27 |
| Şekil 3.12 | Mikrodalga Fırın Şematik Gösterimi | 29 |
| Şekil 4.1 | Deneylerde Kullanılan Levrek Balıkları..... | 33 |
| Şekil 4.2 | Hassas Terazî | 33 |
| Şekil 4.3 | Mikrodalga Fırın | 34 |
| Şekil 4.4 | Vakum Etüvü | 34 |
| Şekil 4.5 | Levrek Balığı Dilimlerinin Mikrodalga Fırında 90 W Güç Değerinde Kurutma Öncesi ve Sonrası ve Görüntüsü..... | 35 |
| Şekil 4.6 | Levrek Balığı Dilimlerinin Mikrodalga Fırında 180 W Güç Değerinde Kurutma Öncesi ve Sonrası Görüntüsü..... | 36 |
| Şekil 4.7 | Levrek Balığı Dilimlerinin Mikrodalga Fırında 360 W Güç Değerinde Kurutma Öncesi ve Sonrası Görüntüsü..... | 36 |
| Şekil 4.8 | Levrek Balığı Dilimlerinin Vakum Etüvünde 60 °C'de Kurutma Öncesi ve Sonrası Görüntüsü..... | 37 |
| Şekil 4.9 | Levrek Balığı Dilimlerinin Vakum Etüvünde 70 °C'de Kurutma Öncesi ve Sonrası Görüntüsü..... | 37 |
| Şekil 4.10 | Levrek Balığı Dilimlerinin Vakum Etüvünde 80 °C'de Kurutma Öncesi ve Sonrası Görüntüsü..... | 37 |

| | | |
|-------------------|--|----|
| Şekil 5.1 | Mikrodalga Fırında Farklı Güç Değerlerindeki Kurutma Eğrileri..... | 42 |
| Şekil 5.2 | Vakum Etüvünde Farklı Sıcaklık Değerlerindeki Kurutma Eğrileri..... | 43 |
| Şekil 5.3 | Farklı Güç Değerlerinde Mikrodalga Fırında Kurutulan Levrek Balığı Dilimlerine ait Kuruma Hızı Değerlerinin Nem İçeriği ile Değişimi | 44 |
| Şekil 5.4 | Farklı Sıcaklık Değerlerinde Vakum Etüvünde Kurutulan Levrek Balığı Dilimlerine ait Kuruma Hızı Değerlerinin Nem İçeriği ile Değişimi | 45 |
| Şekil 5.5 | Mikrodalga Fırında Kurutma Sonucu Zamana Bağlı Nem Oranı Eğrileri | 46 |
| Şekil 5.6 | Vakum Etüvünde Kurutma Sonucu Zamana Bağlı Nem Oranı Eğrileri | 47 |
| Şekil 5.7 | Mikrodalga Fırın için Hesaplanan Deff Değerleri Grafikselsel Gösterimi | 48 |
| Şekil 5.8 | Vakum Etüvü için Hesaplanan Deff Değerleri Grafikselsel Gösterimi | 48 |
| Şekil 5.9 | Mikrodalga Fırın için $\ln(\text{Deff})$ 'in m/P ' ye göre Varyasyonu | 49 |
| Şekil 5.10 | Vakum Etüvü için $\ln(\text{Deff})$ 'in $1/T$ ' ye göre Varyasyonu..... | 50 |
| Şekil 5.11 | Mikrodalga Fırında Elde Edilen Deneysel Veriler ile Midilli Modeli Kullanılarak Hesaplanan Tahmini Nem Oranı Değerleri Grafikselsel Gösterimi | 52 |
| Şekil 5.12 | Vakum Etüvünde Elde Edilen Deneysel Veriler ile Midilli (60 °C için) ve Logarithmic (70 °C ve 80 °C için) Modeli Kullanılarak Hesaplanan Tahmini Nem Oranı Değerleri Grafikselsel Gösterimi..... | 55 |

TABLO LİSTESİ

| | | |
|------------------|--|----|
| Tablo 3.1 | Uygulamalarda Yer Alan Kurutucular ve Özellikleri | 19 |
| Tablo 4.1 | Kuruma Eğrilerinin Modellemesinde Kullanılan Denklemler..... | 39 |
| Tablo 5.1 | Mikrodalga Fırın için Farklı Kurutma Modellerinden Elde Edilen Tahmini Katsayılar ve İstatiksel Veriler..... | 51 |
| Tablo 5.2 | Vakum Etüvü için Farklı Kurutma Modellerinden Elde Edilen Tahmini Katsayılar ve İstatiksel Veriler..... | 54 |



Levrek Balığının Farklı Yöntemlerle Kurutma Kinetiğinin İncelenmesi

Bahtınur Sezin ALKAN

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Nurcan TUĞRUL

Bu çalışmada, farklı kurutma metotları ile levrek balığı dilimleri kurutularak kurutma kinetiği incelenmiş ve doğrusal olmayan regresyon analizine göre kurutma davranışını en iyi ifade eden modeller belirlenmiştir. Levrek balığı dilimlerinin mikrodalga fırın ve vakum etüvünde kurutulması sonucu, farklı güç ve sıcaklık değerlerindeki kuruma süreleri, efektif difüzyon katsayıları ve aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır.

Yapılan yüksek lisans tez çalışması sonucunda; mikrodalga fırında kurutma ile kuruma süresinin çok daha kısa olduğu ve efektif difüzyon katsayılarının daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Mikrodalga fırında çalışılan tüm güç değerleri için en uygun kurutma modeli Midilli olur iken vakum etüvünde için yapılan analizler tek bir modelin seçilemeyeceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Levrek, Mikrodalga, Vakum Etüvü, Kurutma, Kinetik.

Investigation of Drying Kinetics of Seabass with Different Methods

Bahtınur Sezin ALKAN

Department of Chemical Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Nurcan TUĞRUL

In this study, the drying kinetics of seabass slices were investigated by using different drying methods and based on non-linear regression analyses, optimum drying model which describe drying behaviour was determined. Drying times, effective diffusion coefficients and activation were calculated as a result of drying seabass slices in microwave oven at different powers and vacuum oven at different temperatures.

As a result of the MSc. thesis, it is observed that drying time was much shorter and effective diffusion coefficients were higher in microwave drying. While the most suitable model for microwave oven is Midilli, the regression analysis showed that a single method can not be selected for vacuum oven.

Keywords: Seabass, Microwave, Vacuum Oven, Drying, Kinetic.

1.1 Literatür Özeti

Kurutma işlemi, çeşitli tarımsal ve hayvansal besin maddelerinin bozulmadan saklanması için uzun yıllardır uygulanan, önemli gıda muhafaza yöntemlerinden biridir. Yüksek oranda su içeren et ürünleri içerisinde önemli bir protein kaynağı olan balık eti, eski zamanlardan beri geleneksel beslenme alışkanlıkları nedeniyle ve uzun süre saklamak amacıyla kurutulmuş olarak muhafaza edilmektedir. Kurutulmuş balık, İran, Hindistan, Tayland, Rusya, Çin, Malezya ve Amerika Birleşik Devletleri gibi birçok ülkedeki ihraç edilen en önemli deniz ürünlerinden biridir. Dünyada yaygın olarak geleneksel yöntemler ile gerçekleştirilen balık kurutma işlemi kurutma parametrelerinin kontrol edilmesi güçlüğü ve ürünün kontaminasyonlara açık olması gibi kaliteye etki eden önemli riskler taşır. Dolayısıyla hem ürünlerin korunması hem de yeni ürün elde edebilmek için ekonomik yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda teknolojik yöntemlerin ürün çeşidine göre uygulanabilirliği, sistemlerin enerji ihtiyacı gibi konuların araştırılması amacıyla yapılan çalışmalar önem kazanmaktadır[1].

1.1.1 Literatür Çalışmaları

H. Darvishi vd. (2013), 200, 300, 400 ve 500 W güç değerlerinde, mikrodalga kurutucuda gerçekleştirdikleri çalışma sonucu sardalya balığının kurutma kinetiğini incelemiştir; 500 W'lık güç sonucu elde edilen değerlerde maksimum verim sağlandığı ve doğrusal olmayan regresyon analizine göre, Midilli modelinin sardalya balık örneklerinin ince tabaka kuruma davranışını tanımlamak için uygun model olduğu sonucuna varmışlardır [1].

İsmail O. ve Kocabay Ö.G., (2018), çelikbaş alabalığı ile yaptıkları çalışmalarında mikrodalga kurutma ve kızılötesi kurutma yöntemlerini kıyaslamışlardır. Balıkların kurutma kinetiğinin belirlenmesi için, çeşitli deneysel kurutma modelleri

kullanılarak efektif difüzyon katsayısı Fick' in difüzyon yasasına göre belirlenmiştir. Çalışmalar sonucu her iki yöntem için kurutma kinetiği karşılaştırıldığında mikrodalga ile kurutmanın denge nemine ulaşmak için geçen süreyi kısalttığını ve daha etkin olduğunu gözlemlemişlerdir [2].

Duan Z.H. vd, (2010), tatlı su çipurası üzerine yaptıkları çalışma sonucu; kombinasyon kurutma teknolojilerinden olan mikrodalga destekli sıcak hava kurutma yönteminin, tek başına uygulanan mikrodalga yöntemine göre daha etkin ve kaliteli sonuç verdiğini tespit etmişlerdir [3].

Jain D. vd., (2006), güneş altında, karides balığı ve sazan balığını kurutarak balıkların kuruma kinetiklerini incelemiştir. Balıklarda değişen gözenek yapısı ve başlangıç nem miktarının kuruma süresine etki ettiğini gözlemlemiş, farklı koşullarda gerçekleştirilen kurutma işlemleri sonucu matematiksel modellemeler yardımı ile nem içeriğinin bir fonksiyonu olarak ısı ve kütle transfer katsayılarını hesaplamıştır [4].

Sengar, S.H., VD., (2009), tuzlanmış ve tuzlanmamış karidesi güneşte kurutmuş, elde edilen verilere göre işlem süresi, renk ve doku bakımından karidesleri kıyaslamışlardır. Tuzlanmış karideslerin %16.15 nem içeriğine kadar kuruması için 8 saat geçerken; tuzlanmamış karideslerin %15.15 nem içeriğine gelmesi için 15 saat geçtiğini tespit etmişlerdir. Renk ve doku bakımından tuzlanmış karideslerin daha beğenildiğini gözlemlemişlerdir [5].

Mohd R.T. vd., (2010), mikrodalga destekli sıcak hava kurutma yöntemi sonucu; kurutma süresi, dehidrasyon davranışı, enerji tüketimi ve kurutulmuş yayın balıklarının renginde olan değişimi gözlemlemişlerdir. Mikrodalga fırının dehidrasyonu hızlandığı, konvektif sıcak hava kurumasına kıyasla %80-90 arasında enerji tasarrufusağladığı; farklı sıcaklık ve güç denemelerinden sonra, sıcaklıkta tek başına yapılan değişimin, mikrodalga gücünde ki değişim kadar etkili olmadığı sonucuna varmışlardır [6].

1.2 Tezin Amacı

Balık eti; % 66-84 su, % 15-24 protein, % 0,1-22 yağ, % 0,8-2 mineral maddeler ve %1-3 glikojen içerir [78]. Kurutulmuş balıklar; kıyı, orta ve kuzeydoğu

bölgelerinde sıklıkla tüketilen önemli bir besin maddesi olup günümüzde, yüksek oranda protein içerdiği için sağlıklı bir diyet için önemlidir. Geleneksel yöntemlerin kullanıldığı kuru balık çiftliklerinde, kayıpları azaltmak ve ürünlerin kalitesini artırmak için kontrollü yöntemlerin uygulamaya geçirilmesi, kurutulmuş balığın raf ömrünü ve ürün kalitesini arttıracaktır. Bu nedenle, bilimsel yöntemler ile balık kurutma işlemi giderek önem kazanmaktadır [7].

Gıda kurutma yöntemleri ile ilgili literatürde birçok çalışma yer almasına rağmen, balık kurutma işlemine dair teknolojik yöntemler ile ilgili yeterli sayıda çalışma yoktur. Bu da bilimsel yöntemlerin uygulanabilirliği hakkında çalışmaların önemini arttırmaktadır. Bu bağlamda çalışmada mikrodalga ve vakum kurutma yöntemleri ile levrek balığı kurutulmuş, her iki yöntem sonucu elde edilen verilere göre balığın kurutma davranışı incelenmiştir.

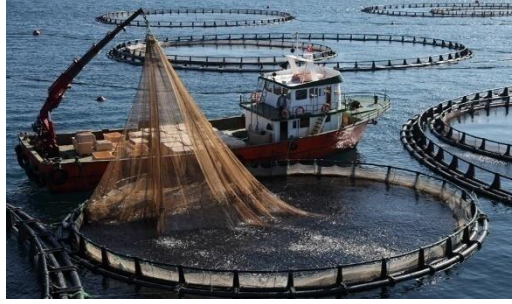
1.3 Hipotez

Çalışmada mikrodalga fırın ve vakum etüvü kullanılarak; iki farklı metot ile levrek balığı dilimlerinin kurutma karakteristiği incelenmiştir. Farklı metotlar uygulanarak kuruma hızı ve gerekli aktivasyon enerjilerinin hesaplanması amaçlanmıştır. Elde edilen veriler ile yapılan matematiksel modelleme sonucu uygun modelin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2.1 Levrek Üretimi

Yaklaşık 450 farklı türü olan levrek balığı, *Dicentrarchus labrax* sinonimi ile sistematikte yer almaktadır. Dalgalı sularda yaşayan levrek balığı, tuzluluk değişimlerine oldukça dayanıklı bir balık türüdür[8,84].

20. yüzyıldan itibaren artan nüfus ve hayvansal ürün ihtiyacına paralel olarak su ürünleri sektöründe büyük ilerleme kaydedilmiştir. Özellikle kültür balıkçılığındaki gelişim büyük paya sahiptir. Dünya genelinde yetiştiricilik ile sağlanan üretimin toplam üretim içindeki payı sürekli olarak artmaktadır. Ülkemizin stratejik konumu, iç ve dış pazardaki büyüme potansiyeli, su ürünleri pazarında Türkiye'yi önemli kılmaktadır. Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü, Türkiye'yi kültür balığı üretiminde dünyada en hızlı artış gösteren 3. ülke olarak açıklamış ve 2013 yılı itibariyle Türkiye, dünyanın en büyük çipura ve levrek üreticisi olmuştur [9].



Şekil 2.1 Kültür Balıkçılığı ile Balık Üretimi [89]

Dünya genelinde bütün Akdeniz'de, İngiltere' nin kuzey sahilleri ve Kanarya Adaları' na kadar olan alanda bulunan levrek, ülkemizde, Ege ve Akdeniz sahillerinde bulunur [10]. Türkiye'nin yıllık su ürünleri üretiminin %52' si deniz sularında yapılmakta olup kalanı kültür balıkçılığında elde edilmektedir. Taze

levrek pazar talebi, beyaz et, düşük yağ içeriği ve arzu edilen aroma gibi kalite özellikleri nedeniyle son yıllarda belirgin bir şekilde artmıştır [11].

2.1.1 Levrek Balığı Besin Değerleri

Besin değerleri bakımından zengin olan levrek balığında bileşenlerin ortalama içeriği, %69,3 su, %18,6 protein, %10,7 yağ, %1,3 kül, %0,1 sakkarit (şeker) şeklindedir. Ana amino asitler aspartik asit ve glutamik asittir. Yüksek miktarda esansiyel amino asit ve mineral (özellikle potasyum, fosfor, kalsiyum, magnezyum, çinko) içerir [11].

2.2 Kurutulmuş Balık

Ağırlığının %16-20' si kadar protein içeren balık eti, ayrıca omega-3 yağ asitleri bakımından zengindir. Zengin besin değerleri ile sağlıklı beslenmenin önemli bir parçası olan balık eti, yüksek oranda su içermesi nedeni ile kısa sürede enzimatik ve kimyasal bozulmalara uğrayabilir. Dolayısı ile balığın avlandığı andan itibaren taşıma, depolama ve nakliye gibi tüm süreçleri kontrol altında olmalıdır. Avlanma bölgesinden uzak bölgelere taşınan balığın, kalite kaybını mümkün mertebe en düşük seviyede tutarak, bozulmadan nihai tüketiciye ulaştırılması için geçmişten günümüze çeşitli muhafaza yöntemleri uygulanmıştır [12]. Önemli yöntemlerden biri olan balık kurutmanın tarihçesi M.Ö 2000 yıllarına uzanır. Günümüzde artan kalite taleplerine bağlı olarak uygulanan pek çok teknolojik metot olmakla birlikte hala bazı bölgelerde geleneksel yöntemler tercih edilmektedir. Geleneksel olarak güneşte kurularak muhafaza edilen balık eti ayrıca çeşitli ön işlemlere tabi tutulmuştur [13].

Tuzlama: İşlem, etin su tutma kapasitesini arttırırken; su aktivitesini düşürmekte ve mikroorganizmaların gelişimini engellemektedir. Yaş ve kuru tuzlama olmak üzere iki farklı şekilde yapılabilir. Kuru tuzlamada uygun bir zemine serilen balıkların üzerine tuz serpilir. Tuzun boyutu ve saflığı önemlidir. Yaş tuzlamada ise et, %20-24 oranında tuz içeren çözelti içerisinde belli bir süre bekletilerek, tuzun ete nüfuz etmesi sağlanır. Genellikle uzun süren tuzlama yönteminde tuz kas içine homojen dağılamamaktadır. Et yüzeyinde tuzun çözünmesi ve bu çözeltinin derişimi, tuzun ete geçmesini düzenleyen ana etmen olmakla birlikte, tuzun

emilme miktarı kas tipine bağlı olarak da değişmektedir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte tuzlama işlemleri enjeksiyon gibi modern yöntemlerle de yapılabilmektedir. Bu yöntemler, üretim verimini arttırmanın yanı sıra işçilik maliyetlerini de düşürmektedir. Ancak, bu yöntemler et yüzeyinde bazı iğne deliklerinin oluşmasına neden olur. Bu nedenle etin derin tabakalarının su ve hava ile kontamine olarak bozulması riski oluşmaktadır [14].

Tütsüleme: Balığı ateşe göstermeden duman aracılığı ile pişirme ve lezzetlendirme işlemidir. Tütsüleme ile etin aromatik ve fiziksel özelliklerine katkı sağlanmış olur. İstenen ağaç türlerinden birinin talaşı kapaklı bir mangal içine konularak yakılır ve dumanı ile balıklar tütsülenir. İşlem sonrası ürünler 3 °C nin altında saklanmalıdır. Soğuk ve sıcak tütsüleme olmak üzere iki farklı şekilde yapılabilir. Soğuk tütsülemede sıcaklık en fazla 43 °C civarındadır. Soğuk füme balıklar, bakteri üremesini engelleyecek kadar susuzlaştırıldığı için 21-36 gün muhafaza edilebilir. Sıcak tütsülemede sıcaklık, 82 °C' ye kadar çıkarılabilir ve soğuk füme işlemine kıyasla daha kısa sürer[12,15,16].



Şekil 2.2 Balık Tütsüleme İşlemi [85]

3.1 Kurutmaya Giriş

Kimyasal işlem endüstrilerinde kurutma, bir katıdan veya bir gazdan nemi uzaklaştırmak için kullanılan önemli bir yöntemdir. Gıda muhafaza yöntemlerinden biri olarak da eski zamanlardan beri uygulanmaktadır. Kurutma yöntemleri, geleneksel yöntem (güneşte kurutma) dışında 3 ana grupta toplanabilir:

- Atmosferik basınçta sıcak hava (iletimi veya taşınımı) ile kurutma
- Vakumda kurutma
- Dondurarak kurutma

Kurutma sırasında kullanılacak ekipman ve uygulanacak yöntem, malzemenin niteliği ve ısı temin şekli gibi çeşitli kriterler göz önünde bulundurularak belirlenmektedir [17]. Kurutma işleminin verimliliğine, ürün kalitesinin korunmasına ve işlem maliyetini düşürmeye dayalı yeni kurutma teknolojileri giderek önem kazanmaktadır. Işığa, oksidasyona ve ısıya maruz kalmayı en aza indiren sistemler ile kritik biyoaktif bileşiklerin zarar görmesi en aza indirilir ve besin değeri, kurutma işleminden minimum düzeyde etkilenmiş olur. Günümüzde gıda piyasasında kurutulmuş gıdalar, gıda tedarik zincirinde önemli bir rol oynamaktadır. Kuru gıdalar lezzetli, besleyici, hafif aynı zamanda hazırlaması, saklaması ve kullanımı kolaydır. Besinlerin besin değeri kurutmadan sadece minimum düzeyde etkilenir. Kurutma işlemi, konserve veya dondurma işlemine kıyasla daha ekonomiktir [18].

Besleyici değeri yüksek olan et ürünlerinin, sağlıklı bir beslenmede muhakkak yer alması gerekir. Et ürünleri, yüksek biyolojik değerli proteinlerin, vitaminlerin ve minerallerin de önemli bir kaynağı olup; et tüketimi, insan sağlığı için oldukça

önemlidir. Ancak et, yüksek su aktivitesine sahip bir gıda maddesi olduğu için uygun olmayan şartlar altında hızla bozulmaya müsaittir [16]. İnsanların yaşam tarzlarının da değişmesi ile işlenmiş et ürünlerine olan talep küresel olarak artmıştır. Bu bağlamda soğutma tesislerine ihtiyaç olmadan depolanabilen, pazarlanabilen, daha düşük maliyetli, kaliteli ve raf ömrü uzun kurutulmuş et ürünlerinin üretimi giderek yaygınlaşmaktadır [19]. Kurutulmuş et ürünleri günümüzde hem sağlıklı bir diyetin parçası olarak hem de farklı ve yeni gıda ürünlerinin bir aroma bileşeni olarak hazır çorba, bebek mamaları veya evcil hayvan yemleri gibi farklı ürünlerin üretiminde kullanılır ve yeni ürün geliştirme çalışmalarında alternatif bir ürün grubu olarak değerlendirilir [16].



Şekil 3.1 Geleneksel Yöntem ile Kurutulmuş Balıklar [86]

Geleneksel yöntemler ile kuru balık üreten çiftliklerde, ürün kayıplarını azaltmak ve kalitesini artırmak için uygun işleme prosedürlerinin kullanılması, kurutulmuş balığın raf ömrü için önemlidir. Bu nedenle, yapay kurutma yöntemleri (geleneksel olmayan) ile balık kurutma işlemi giderek önem kazanmaktadır [7].

3.1 Kurutma Mekanizması

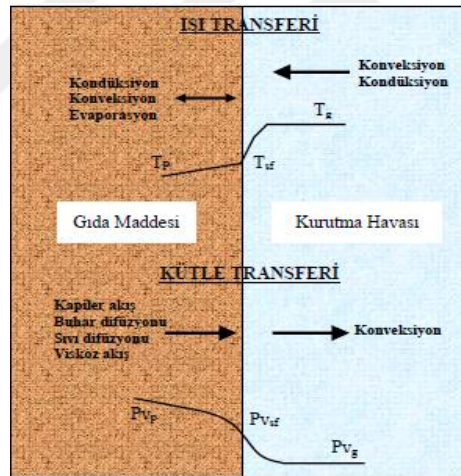
Gıda kurutmada temel amaç, maddelerin su ve mikrobiyal aktivitesini azaltarak raf ömrünü uzatmak, hacim ve ağırlığı azaltarak paketleme ve depolama maliyetlerini düşürebilmektir [20].

Endüstride geniş bir uygulama alanına sahip olan kurutma işlemi; güneş enerjili sistemler, fırın kurutucular, tünel kurutucular, püskürtmeli kurutucular, silindir kurutucular, mikrodalga, kızılötesi vb farklı teknolojiler ile uygulanabilir. Etkin bir kurutma işleminde amaç; hızlı kurutmanın yanı sıra, kaliteli bir ürün elde

edebilmektir. Kalite kaybının mümkün olduğunca düşük seviyede tutulmak istenmesi, enerji verimliliği ve maliyet gibi konular göz önünde bulundurularak kurutma yöntemlerinden uygun olanları birlikte de kullanılabilir [21]. Yeni teknolojilerin gelişmesiyle, kurutma işlemleri sırasında sıcaklık, ağırlık, güç, koku gibi birçok parametrenin kontrol edilmesi mümkündür [22]. Konu ile ilgili yapılmış olan çalışmalar incelendiğinde fırın, tünel ve püskürtmeli kurutucuların mikrodalga ile desteklendiği; mikrodalga ve kızılötesi yöntemlerinin bir arada kullanıldığı sistemler ile gerçekleştirilen gıda kurutma çalışmalarının arttığı görülmektedir [21].

Kurutma, temel olarak, ısı ve kütle taşınım prensiplerine dayanır. İşlem sırasında aşağıdaki iki temel süreç birlikte gerçekleşmektedir [23].

- Enerji transferi: Taşınım, iletim veya radyasyonun bir sonucu olarak; bazı durumlarda ise bu etkilerin birleşiminin sonucu olarak gerçekleşebilir.
- Suyun katının yüzeyine difüzyonu ve buharlaşması.



Şekil 3.2 Kuruma Esnasında Gerçekleşen Isı ve Kütle Aktarımının Şematik Gösterimi [23]

Isı ve kütle aktarımı, kurutma işlemlerinde eşzamanlı gerçekleşen kritik mekanizmalardır. Sıvının buharlaşması için ürüne önce ısı aktarılır ve ardından kütle, ortama buhar olarak geçişi sağlanır. Isı ve kütle transferini etkileyen faktörler aynı zamanda kurutma hızını da etkiler [24]. Buharlaşma, kurutulacak olan ürüne ve kurutma şartlarına bağlı olarak yüzeyde ya da ürün içinde meydana

gelebilir. Kuruma, hem dış koşullar hem de katının iç yapısından etkilenir ancak bu faktörlerin etki derecesi kuruma periyoduna bağlı olarak değişmektedir. Sabit hızda kuruma periyodunda, ısı ve kütle aktarımı, katı-gaz ara yüzeyindeki koşullara bağlı iken; azalan hız periyodunda katı içindeki direnç önemli hale gelir [23]. Katı gıdaların kurutulması, zor bir süreç olmakla birlikte, parçalama, ısıtma veya dondurma gibi çeşitli ön işlemlerin uygulanması ile suyun katıdan daha kolay uzaklaştırılması ve buna bağlı olarak da kurutmanın daha hızlı olması sağlanabilmektedir [16].

Kurutma sırasında meydana gelen kimyasal (renk, tat vb) ve fiziksel değişiklikler (kristalleşme, büzülme vb.), ısı ve kütle aktarımını etkiler [25]. Genel olarak kurutma sırasında meydana gelen değişiklikler, aşağıdaki gibi sıralanabilir [26]:

➤ **Kuru madde birikimi:**

Suyun dokudaki gözenekler içindeki hareketi, doğrudan bir sıvı hareketi, su buharı veya bireysel serbest su molekülleri gibi farklı şekillerde gerçekleşebilir. Gözenek içindeki hareket sıvı hareketi şeklinde ise, kuruma sırasında yüzeye sıvı ile beraber kuru madde taşınabilir. Böylece alt tabakalardaki kuru madde, su ile yüzeye taşınır ve su uzaklaşıp gidince, yüzeyde bir miktar kuru madde birikir. Yüzeyde kuru madde konsantrasyonunun artması sonucu, iç kısımlarda düşmüş konsantrasyonu dengelemek amacıyla yüzeyden içeriye doğru kuru madde akımı gerçekleşir. Kurutmada uygulanan koşullara göre, kuru maddenin tanımlanan bu hareketlerinden biri egemen olabilir ve bunun sonucu olarak yüzeyde veya merkezde aşırı kuru madde birikimi gözlenir [27].

➤ **Kabuk bağlama:**

Kurutmanın ilk aşamalarında yüksek sıcaklık uygulanırsa ürün yüzeyinde hızlı kuruma olur ve kuru tabakanın büzülmesi sonucu alt tabakalar baskılanır. Hala ıslak olan iç kısımlar, kuru üst yüzeyin yaptığı bu basınca direnç gösterir. Bu nedenle kuruyan üst yüzey büzülmez ve ürün yüzeyinde sert bir kabuk oluşur. Sonrasında kuruma hızı aniden düşer ve iç kısımlarda da tam kuruma sağlanamaz [27].

➤ **Boyut Küçülmesi ve Rehidrasyon:**

Kurutma yöntemi ve koşulları; ürünün boyut küçülmesi, porozite ve yoğunluk özelliklerini etkiler. Sıcaklık uygulaması ve su kaybı, et proteinlerinin yapısında büzölmelere, gözenek oluşumuna ve mikro yapıda birtakım değışikliklere neden olur. Kurutma esnasında, materyaldeki düzensiz su ve sıcaklık değışiminden kaynaklanan düzensiz hacim değışiminin yol açtığı kırılma ve çatlamlar önemli kalite bozulmaları olarak değerlendirilir. Kurutulmuş gıdaların rehidrasyon yeteneği, kurutma işlem koşulları yanı sıra etin bileşimi, pH değeri, yoğunluğu ve gözenekliliğine bağlıdır. Büzölme gibi hücre sel ve yapısal bozulmalar en aza indirildiğinde ürünün rehidrasyon yeteneği en yüksek seviyeye çıkar. Özellikle dondurarak kurutma işlemi ile elde edilen gözenekli yapıdaki ürünler; daha az büzölme, üstün tat sağlama ve daha iyi rehidrasyon özelliklerine sahiptir [28].

➤ **Esmerleşme:**

Kurutulmuş gıdaların rengini, enzimatik ve enzimatik olmayan esmerleşme reaksiyonları önemli ölçüde etkiler. Kurutulmuş et ürünlerinin renginde ise, kuruma süresince devam eden, kasta bulunan az miktardaki glikoz ve serbest aminoasitlerin esmerleşme reaksiyonu olarak tanımlanan Maillard reaksiyonu etkili olur. Maillard reaksiyonu sonucu oluşan organik ürünler, kuru etin rengi yanı sıra dokusu, aroması, lezzeti ve besin değeri de etkiler. Reaksiyon sonucu oluşan uçucu özellikte olan düşük moleköl ağırlıklı ürünler, aroma oluşumunda etkilidir. Melanoidin olarak bilinen kahverengi pigmentler bakımından baskın, yüksek moleköl ağırlıklı ürünler ise gıdanın kızararak renk değıştirmesine neden olurlar. Bu renk değışiminin minimum düzeyde tutulması ürün kalitesi açısından önemlidir [28,29,30].

➤ **Lipid oksidasyonu:**

Lipidoksidasyonu, kurutulmuş gıdalarda kötü lezzet oluşumuna, yağda çözünen vitamin ve pigmentlerin kaybına sebep olur. Kurutulmuş et ürünlerinde bulunan gliserit ve fosfolipitler, lipoliz sonucunda serbest yağ asitlerine dönüşür. Oluşan bu serbest yağ asitlerinden doymamış olanlar, oksidasyon reaksiyonlarına daha yatkındır [28]. Oksidasyon reaksiyonları sonucu et ürünlerinin lezzetinde meydana

gelen acı tat ve koku oluşumuna ransidite denir. Yağ asidi oksidasyonu, et ürünlerinin; rengini, lezzetini, besleyici değerini etkilemektedir [31].

➤ **Besin değerinde azalma:**

Suda eriyen vitaminler ve uçucu öğelerde azalma meydana gelir [32].

3.2 Ürün Nem Miktarı ve Nem Oranı Hesabı

Doymuş hava ile denge halinde olan maddenin sahip olduğu en düşük su konsantrasyonuna “bağlı su” denir. Nem içeriği, ürün içerisinde bulunan bağlı nemin ölçüsüdür. Nem içeriği, (%) yağ baz ve (%) kuru baz olmak üzere iki farklı şekilde ifade edilir [33].

➤ Yağ baza göre nem içeriği:

$$\%N_{yb} = \frac{M_s}{M_s + M_k} \times 100 \quad (3.1)$$

➤ Kuru baza göre nem içeriği:

$$\%N_{kb} = \frac{M_s}{M_k} \times 100 \quad (3.2)$$

Kuru ve yağ baza göre nem oranları aşağıda verilen eşitlikler yardımı ile birbirine çevrilebilir.

$$\%N_{kb} = \frac{N}{100 - N_{yb}} \quad (3.3)$$

Ürünün herhangi bir t anında sahip olduğu nem içeriğinin (N_t), başlangıç anındaki nem içeriğine (N_0) oranına “Nem oranı” denilmektedir. Nem oranı, (3.4) eşitliği ile ifade edilir.

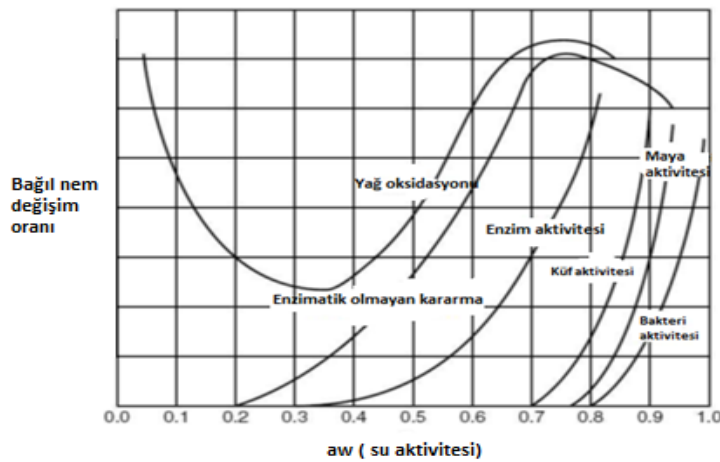
$$MR = \frac{N - N_d}{N_0 - N_d} \quad (3.4)$$

Kurutulacak materyaldeki nem içeriği; kurutma açısından karakteristik olan değerlerine göre; denge nemi, kritik nem, maksimum nem miktarı, başlangıç nemi ve maksimum higroskopik nem olarak sınıflandırılır. Bunların kısaca tanımları aşağıdaki gibidir [34]:

- ✓ Denge nemi: Kurutma sonunda ulaşılabilecek en düşük nem miktarıdır, ürün içindeki suyun buhar basıncı ile ortamdaki havanın buhar basıncı denge halindedir.
- ✓ Kritik nem: Yüzeyde buharlaşacak nemin bittiği ve sabit kuruma hızının sona erdiği noktadaki neme denir.
- ✓ Maksimum nem içeriği: Katı içindeki tüm boşlukların sıvı ile dolu olduğu andaki neme denir.
- ✓ Başlangıç nemi: Kurutma başlangıcında ürünün sahip olduğu nem miktarıdır.

3.3 Su Aktivitesi

Su aktivitesi ürünün işlenmesi ve depolaması sırasında meydana gelebilecek fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik faaliyetleri etkilediği için oldukça önemlidir. Mikroorganizmaların, bir gıdada bozulmaya neden olabilmesi, ortamdaki su miktarına bağlıdır. Gıdadaki su aktivitesinin düşürülmesi dehidrasyon, kristalizasyon yardımı ile gerçekleştirilmektedir. Kurutma işlemi ile gıdada bulunan bu suyun büyük bir kısmının uzaklaştırılarak mikrobiyal bozulmalar, küf ve bakteri oluşumu engellenir. Gıdanın sahip olduğu ve mikroorganizmalar tarafından kullanılabilen su miktarına o gıdanın su aktivitesi (a_w) denir. Su aktivitesi değeri, ürünün içindeki serbest suyun kısmi basıncının (P_i) aynı sıcaklıktaki saf suyun buhar basıncına (P_0) oranı olarak ifade edilmektedir [34,35].

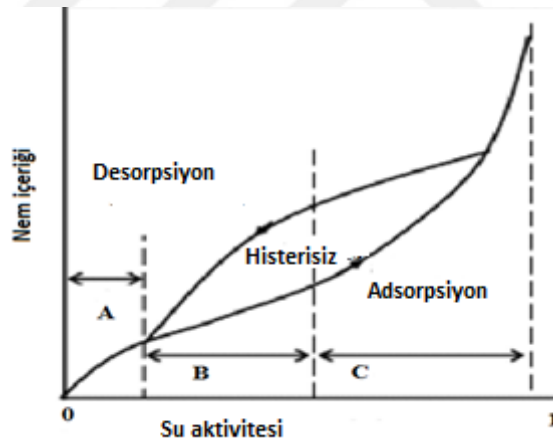


Şekil 3.3 Su Aktivitesi ile Gıdadaki Bozulma Reaksiyonları Arasındaki İlişki [34]

Su aktivitesi, gıda içindeki kimyasal ve biyokimyasal reaksiyonları etkiler ve gıda ürününde a_w değeri düştükçe reaksiyon oranları da azalır. Su aktivitesi ile bozulma reaksiyonları arasındaki ilişki Şekil 3.3' te gösterilmiştir. a_w değerinin 0.7' nin altına düşmesi ile mikrobiyolojik bozulma önlenir. Gıda maddesinde $a_w=0.7$ değerinin altında mikrobiyal bozulma olmamasına rağmen, kaliteli bir kuru ürün elde edebilmek ve uzun süreli muhafaza için a_w değerinin 0.3' ün altına düşürülerek diğer bozulma reaksiyonlarının da engellenmesi gerekmektedir [34,35].

3.4 Sorpsiyon İzotermi

Denge nemi, ortamın sıcaklığına bağlı olarak değişir. Denge nem miktarı ile ortamın bağıl nemi grafiğinden sorpsiyon izotermi elde edilir. İzoterm eğrisinde, şekildeki gibi 3 farklı bölge vardır. Aynı su aktivitesi değerlerinde desorpsiyon yoluyla ulaşılan denge nem miktarı, adsorpsiyonla ulaşılanlara göre daha yüksek olur. Desorpsiyon ve adsorpsiyon eğrilerinin çakışmaması durumuna "histerisiz" denir [36].



Şekil 3.4 Tipik Bir Gıda Ürünü için Sorpsiyon İzotermi [36].

A bölgesindeki su, üründe kuvvetli şekilde bağlı olan suyu temsil eder ve buharlaşma entalpisi saf suyunkinden çok daha yüksektir. Bağlı su, gıdalarda protein, karbonhidrat gibi su tutucu bileşiklerin yüzeyleri tarafından tutulan sudur. Gıda yapısındaki olası kimyasal tepkimeler, bağlı sudan etkilenmez. B bölgesinde, su molekülleri ilk bölgeye kıyasla daha az sıkı bağlıdır ve genellikle

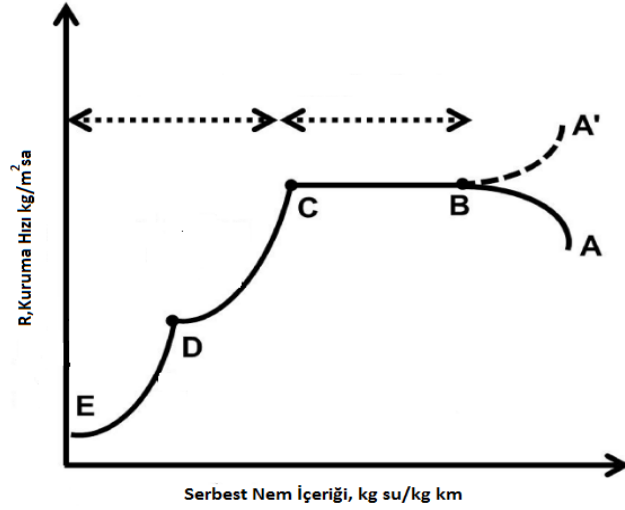
küçük kılcal damarlarda bulunurlar. Buharlaşma entalpisi, saf suyunkinden biraz daha yüksektir. C bölgesindeki suyun özellikleri, boşluklarda, büyük kılcallarda tutulan serbest suyun özelliklerine benzer özellik gösterir ve bu bölgedeki su gıda maddelerine gevşek bir şekilde bağlıdır [36].

Sorpsiyon izotermeleri, gıda teknolojisinde, kurutma ekipmanlarının tasarımı ve optimizasyonu, ambalajların tasarımı, kalite tahminleri, raf ömrü ve depolama sırasında oluşabilecek nem değişimlerinin hesaplanması için kullanılmaktadır [36].

3.5 Kuruma Esnasında Görülen Evreler

Gıdalarda su; moleküller arasındaki boşluklarda, kılcal borularda veya yüzey tarafından yutulmuş olarak bulunur. Kurutma olayı, katı materyalden taşıyıcı ortama nemin iletilmesi (kütle transferi) işlemi olarak tanımlanabilir. İşlem sonrası gıdadan uzaklaştırılan üründeki serbest sudur. Burada kütle transferi için itici güç, katının toplam nem içeriğiyle denge nemi arasındaki farktan sağlanır. Sıcak hava, materyalden uzaklaştırılmak istenen suya gerekli buharlaşma gizli ısını sağlayarak aynı zamanda buharlaşma yüzeyi yakınlarında oluşan su buharının taşınmasını sağlar ve nemi uzaklaşmış olur. Islak katının kuruma davranışı, zaman ve ürünün ortalama nem içeriği ile elde edilen grafik yardımı ile incelenir [37].

Birim zamanda birim alandan buharlaşan su kütlesi kurutma hızını gösterir. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen bilgiler, sabit kurutma koşulları (hava hızı, sıcaklık, nem) altında katıya ait nem miktarının zamanın bir fonksiyonu olarak değiştiğini göstermektedir [38]. Kuruma sırasında görülen evreler aşağıdaki gibidir:



Şekil 3.5 Kuruma Eğrisi [39]

Geçiş Bölgesi (AB): Bu evrede katının yüzey koşulları ile kurutucu hava dengeye gelir. A noktasında başlangıçtaki serbest nem değeri gözlenir. Başlangıçta ortamdaki daha soğuk olan ıslak katının ısınması ile buharlaşma hızı artar. Katının, ortamdaki daha sıcak olduğu durumda hız eğrisi A' noktasından başlar [37,39].

Sabit Hız Bölgesi (BC): Sabit hızda kuruma periyodunda katı yüzeyi ıslaktır ve suyun yüzeyden buharlaşma hızı ile ürünün içindeki nemin yüzeye hareket hızı aynıdır. Sabit hız evresi, gıdanın yüzeyinde buharlaşan nem bittiğinde sona erer ve bu noktadaki nem içeriği "kritik nem içeriği" olarak tanımlanır. İlk etapta buharlaşma çok hızlı gerçekleşir ancak daha sonra yüzeyde oluşan buhar nedeniyle yavaşlar. Kuruma hızı, başlangıç nemi, hava akım hızı, modeli ve sıcaklığına bağlıdır. Şekil 3.5' de görülen B noktasında yüzey sıcaklığı denge değerine ulaşmış olur. BC noktaları arasında kuruma hızı sabittir ve eğrideki alan sabit kuruma hızı bölgesidir [40]. Sabit hızda kuruma periyodunda kuruma hızı; kurutulan gıdanın kalınlığına, ortam sıcaklığına, toplam basınca ve kısmi buhar basıncına bağlı olarak değişir [41].

Azalan Hız Bölgesi, CD-DE: Sabit hız bölgesinden sonra maddenin iç yüzeyinde buharlaşma başlar ve azalan hız evresine geçilmiş olur. Yüzeye yakın bölümler iç kısımlara nazaran daha fazla su kaybettiği için kuruyan maddenin dış yüzeyinde kabuk bağlama, buruşma, çatlama ve kuruma vb. değişimler olur. Dolayısıyla bu

evrede buharlaşan nem miktarı azalır. Yüzeyin kurummasını da içeren bu bölge (CD-DE) azalan hız bölgesi olarak adlandırılır. Yüzeyin tamamen kuruduğu D noktasına kadar birinci azalan hız bölgesi devam eder ve D noktasından itibaren ise ikinci azalan hız bölgesi başlar. Bu evrede buharlaşma denge nemine erişilinceye kadar devam eder [37]. Difüzyon teorisi ile kütle aktarımı açıklanırken aşağıdaki gibi bazı varsayımlar yapılmaktadır [41]:

- ✓ Kütle aktarımı materyalin merkezine göre simetriktir.
- ✓ Sadece difüzyon ile kütle transferi gerçekleşir.
- ✓ Difüzyon katsayısı sabit olup yüzeydeki büzüşme ihmal edilebilir.

3.6 Kuruma Hızına Etki Eden Faktörler

Kuruma hızına etki eden başlıca faktörler; sıcaklık derecesi, havanın nemi ve havanın kurutucudaki hızı, ortam basıncı, yüzey alanı (parçanın büyüklüğü, şekli vb.) gibi fiziksel faktörler olarak sıralanabilir [42].

Sıcaklık derecesi: Kurutma işleminde ortamının sıcaklığı ile gıdanın kurutulmadan önceki sıcaklığı önemlidir. İki sıcaklık arasındaki farka bağlı olarak ısı transfer hızı değişir, aradaki fark arttıkça kurutma hızı da artar. Ancak, çok yüksek sıcaklıklarda birtakım dezavantajlar (çatlama, renk değişimi (esmerleşme) ve kalite düşmeleri) ortaya çıkar. Düşük sıcaklıklar ise kurutma süresinin gereksiz uzamasına neden olur. Dolayısıyla, kurutma sıcaklığı istenen kalitede bir ürün elde etmek için optimum kurutma hızını sağlayacak önemli bir parametredir [43].

Yüzey alanı: Kurutulacak gıdanın birim yüzey alanı, ısı ve kütle aktarım hızını doğrudan etkiler. Ürün küçük parçalar halinde kurutulduğunda daha büyük bir yüzey alanı elde edilir ve ısı transferi daha geniş bir alanda gerçekleşir. Bu da kurumanın daha kısa sürede ve hızlı gerçekleşmesini sağlar [44].

Havanın nemi: Kuruma teorik olarak maddeyi çevreleyen havadaki su buharının madde içerisindeki nem ile dengeye geldiği anda sona erer. Ortamın nemi arttığında veya azaltıldığında maddedeki nem değişimi farklı karakteristiklere sahip olmaktadır. Kurutma işlemi ile, ürün içindeki su uzaklaştırılır. Katı içinde sıvı formda hapsedilmiş olarak bulunan neme bağlı nem denir ve bu nemin buhar

basıncı saf suyun buhar basıncından düşüktür. Bağlı nemin katı içinde aşırı miktarda bulunması durumundaki fazla nem de bağıl olmayan nemdir. Maddenin taşıdığı suyun kuru maddeye oranı nem kesri olarak adlandırılır. Bu denge durumundaki nem kesrine denge veya minimum nem kesri denir [41].

Ortamın basıncı: Sıvılar her sıcaklıkta buharlaşır. Bir sıvının yüzeyindeki moleküllerin kinetik enerjisi, sıvı moleküllerini bir arada tutan moleküller arası çekim kuvvetini yenecek kadar büyük olduğunda sıvı molekülleri buharlaşmaya başlar. Gaz haline geçen bu moleküllerin sıvının yüzeyinde oluşturduğu basınca buhar basıncı denir. Buhar basıncı dış basınca (sıvı ağızı açık bir kaptaki bulunuyorsa atmosfer basıncına) eşit olduğu zaman sıvı, kaynamaya başlar. Dolayısıyla bir sıvının kaynama noktası ortamdaki basınca bağlıdır. Su, deniz seviyesinde (1 atmosfer basıncında) 100 °C' de kaynar. Bu değerin altındaki basınçlarda ise kaynama olayı daha düşük sıcaklıklarda başlar. Yani kaynama derecesi sabit tutularak ortam basıncı düşürüldüğünde kaynama işlemi hızlanır. Atmosfere kapalı bir ortama konulan ürünlerdeki su, daha düşük sıcaklık derecelerinde uzaklaştırılabilir. Bu durum düşük kurutma derecelerinde kısa süreli kurutma yönünden ısıya duyarlı ürünler için bir avantajdır [45].

Kurutma Hava Hızı: Kurutma havasının hızının fazla olması iç kısımlardaki kurumayı hızlandıracağı için dış yüzeye doğru olan su akışı bozulur. Buna bağlı olarak üründe çatlama, sertleşmeler meydana gelir. Hava hızının düşük olması halinde ise nemin materyalden uzaklaşması güçleşir. Başarılı bir kuruma işlemi için kuruma havasının hızı önemlidir [46].

3.7 Kurutma Yöntemleri ve Kurutucu Tipleri

Kurutma, yöntem olarak geleneksel yöntem olarak bilinen "güneşte kurutma" ve kontrollü sistemleri içeren "yapay kurutma" olarak iki farklı grupta incelenebilir. Güneşte kurutma yönteminde işlem süresinin uzun olması, ürün kalitesinin istenen seviyede olmaması yapay kurutma yöntemlerini ön plana çıkarmıştır. Kurutma yönteminin belirlenmesinde enerji ve zaman verimliliği en önemli iki faktördür [47].

Tablo 3.1 Uygulamalarda Yer Alan Kurutucular ve Özellikleri [48]

| KRİTER | KURUTUCU TİPİ |
|--|--|
| Çalışma Şekli | Kesikli, sürekli |
| Isı Transfer Tipi | Konveksiyon, kondüksiyon, radyasyon, elektromanyetik alan veya bunların birlikte uygulanması |
| Materyalin konumu | Durgun, hareketli, titreşimli, dağıtılmış |
| Materyalin fiziksel durumu | Katı, sıvı, pelte, öğütülmüş, cips, sürekli tabaka, v.b. |
| İşletme basıncı | Vakum, atmosferik |
| Kurutucu akışkan | Hava, süper ısıtılmış buhar, uçucu gazlar |
| Kurutma sıcaklığı | Kaynama sıcaklığının altında, kaynama sıcaklığının üstünde, donma noktasının altında |
| Materyal ve kurutucu akışkanın birbirine göre bağlı hareketi | Paralel, karşı, karışık, çapraz akışlı |
| Kurutucuda kalma süresi | Kısa (30 dk), orta (1-30 dk), uzun (>30 dk) |

Kurutmaya etki eden parametrelerin kontrol edilebilir olduğu yapay sistemler için geliştirilmiş olan birçok yöntem mevcuttur [26]. Nemli ve kurutulmuş malzemenin fiziksel özellikleri, kurutma işleminin başlangıcında ürünün nem yüzdesi ve uzaklaştırılacak nem miktarı, kurutma sıcaklığı, birim zamanda kurutulacak ürün miktarı gibi çeşitli konular dikkate alınarak geliştirilmiş olan kurutucular ve özellikleri Tablo (3.1) ile özetlenmiştir [48].

Kurutucu seçiminde ürünün fiziksel ve kimyasal yapısı, kurutulacak ürün miktarı, başlangıç ve hedeflenen nem miktarı gibi ürün özellikleri değerlendirilerek aşağıdaki ana adımlar izlenir [48,49].

- ✓ Kurutucuların ön seçimi: Kurutucularda bütün işlemlerin sürekliliği ve üründe istenen fiziksel ve kalite özelliklerini elde edilmesi ön koşulu aranır.
- ✓ Kurutucuların ön karşılaştırılması: Seçilen kurutuculardan elde edilen verilere göre yaklaşık maliyet ve verimlilik karşılaştırılır. Bu ön değerlendirmede verimli veya ekonomik olmayan kurutucular elenmiş olur.

- ✓ Kurutma denemeleri (testleri): Bu denemeler değerlendirmeye alınmakta olan kurutucu tipleri için yapılır. Laboratuvar ortamında yapılan testler optimum çalışma koşullarını ve kurutulmuş ürün karakteristiklerini belirler ve ayrıca bilgilerinin doğruluğu sınanmış olur.
- ✓ Kurutucu seçimi: Tüm bu testlerden ve kurutulmuş ürün özelliklerinin değerlendirilmesiyle kurutucu seçimine karar verilir

3.7.1 Güneşte Kurutma

Güneşte kurutma, sebzelerin, meyvelerin, balıkların, etlerin vb. tarımsal ve hayvansal gıdaların korunması için güneş enerjisinin kullanıldığı en eski yöntemlerden biridir. Tarih öncesi zamanlardan beri insanoğlu güneşten, kış için gerekli tüm gıda maddelerini korumak, evleri için toprak tuğlaları ve giyinmek için hayvan derileri kurutmak için faydalanmıştır [50].

Güneş enerjisinden yararlanarak gerçekleştirilen kurutma işlemi 3 farklı şekilde sınıflandırılır [48]:

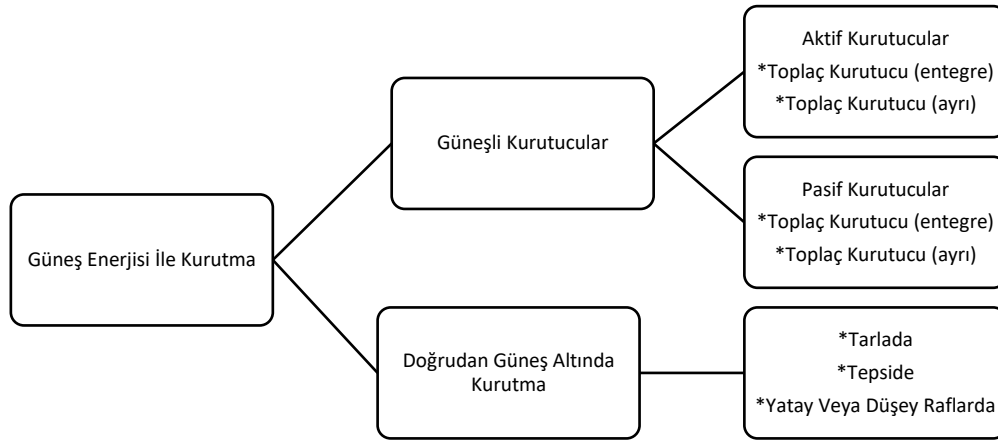
- Ürünün güneş altında direk kurutulduğu doğal sistemler
- Ek enerji olmadan kurulan pasif sistemler
- Ek enerji ile kurulan aktif sistemler



Şekil 3.6 Güneşte Kurutulmuş Balıklar [87]

Doğal yöntemler ile kurutma işleminde ürün açık havada doğrudan güneş ışınlarına maruz bırakılırken, pasif sistemler olarak bilinen güneşte kurutma işleminde sera tipi yapılar kullanılarak malzeme, doğa olaylarından korunmuş

olur. Kurutma havasının materyale zorlanmış konveksiyon ile iletildiği aktif sistemlerde ise güneş pilleri veya rüzgar enerjisi ile çalışan fanlar kullanılır [51].



Şekil 3.7 Kurutma İşleminde Güneş Enerjisinin Kullanılma Yöntemleri [51]

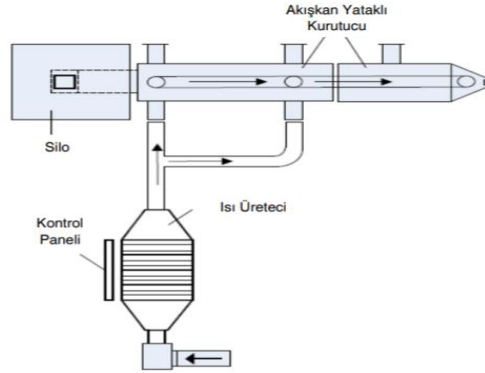
Geleneksel kurutma işlemi esnasında ürünler, ince tabaka halinde mümkün olduğunca geniş alanlarda yayılarak istenen nem oranına kadar kurutulur. Zaman zaman nemi uzaklaştırmak için ürünler ters çevrilir. Kurutulan ürünlerdeki nem oranı ve alana göre işlem, 10-30 gün sürmektedir. Bu süre zarfında kurutulan ürünler, tüm hava değişikliklerine ve böcek, toz vs. gibi doğal saldırılara maruz kalır. İşlem süresi hem güneş ışınlarının yoğunluğuna hem de ortamın nemine bağlıdır. Başlangıç sermayesinin düşük olması, ucuz iş gücü gibi avantajları nedeni ile gelişmekte olan ülkelerde kurutulan gıda ürünlerinin %80' i bu yöntem ile elde edilmektedir. Ancak çevre koşullarına bağlı işlemin ürün kalitesi ve işlem süresi bakımından ciddi dezavantajları vardır [50]:

- ✓ İşlem sonrasında nihai nem içeriği ve ürün kalitesine dair bilimsel bir kontrol söz konusu değildir.
- ✓ Ürün, malzemeyi tamamen çürütebilecek yağmur, şiddetli rüzgar gibi hava koşullarına, böcek, küf ve bakterilere doğrudan maruz kalır.

3.7.2 Akışkan Yataklı Kurutma

Katı parçacıkların, gaz veya sıvı ile teması sonucu akışkan özellik kazanması işlemine akışkanlaştırma denir. Akışkan yataklar, endüstride katı tanecikli

malzemelerin işlenmesinde sıklıkla kullanılır. Hızlı ısı ve kütle transferi sağlamaları yanı sıra homojen dağılım sağlaması önemli avantajları arasındadır [52].



Şekil 3.8 Tipik Bir Akışkan Yataklı Kurutucu [53]

Akışkan yataklı kurutma, kesikli ya da sürekli sistemler şeklinde uygulanabilir. Akışkan yataklı kurutuculardaki ısıtılmış hava, alttan tel örgü ile desteklenen bir kurutma odasında bulunan ıslak maddelerin arasından fan aracılığı ile yukarı doğru hareket eder. Bu kurutma tipinde tanecikler hareket etmez ve istenilen nem oranına ulaşıldığında hava akımı kesilerek ürün kurutucudan çıkarılır. Sürekli kurutmada ise ıslak madde sürekli olarak kurutucuya beslenirken, istenen nem oranına sahip kuru madde ise sürekli olarak kurutucudan çıkarılır. Bu sistemde akışkan yataklı kurutucu devamlı olarak çalışır. Sürekli yatay kurutucularda katı taneciklerinin birim boyunca hareket etmesini sağlayan titreşimli bir taşıyıcı vardır. Kurutucuda havanın hızı, katıların homojen olarak karışmasını ve gaz ile katı taneciklerin devamlı temas halinde olmasını sağlayacak şekilde ayarlanabilir [54].

Akışkan yataklı kurutucuların avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- ✓ Yatak içerisinde dağılımın homojen olmasına bağlı olarak sürekli akış sağlanabilmesi ve kolaylığı,
- ✓ Nemin hızlı ve istenen ölçüde uzaklaştırılabilmesi,
- ✓ İşlem süresinin kısa olması
- ✓ Elde edilen ürünün homojen yapıda olmasıdır.

Elektrik tüketiminin yüksek olması, ince partiküllerin birikme sorunu, boru ve tamburlarda korozyon oluşumu gibi durumlar dezavantajları arasında gösterilmektedir [53].

3.7.3 Tünel Tipi Kurutucular

Bu tip kurutucularda malzeme bir tünel içinde hareket eden kurutma vagonlarına yerleştirilerek sıcak hava ile teması sağlanır. Hava ve ürünün birbirine göre hareket yönleri; paralel, zıt veya vagonların takip ettikleri yola dik yönde olabilir [55]. Tünelin bir ucundan kurumuş ürünleri içeren raf arabası çıktığında, diğer uçtan yaş ürünle yüklenmiş yeni bir araba tünele girer [46].

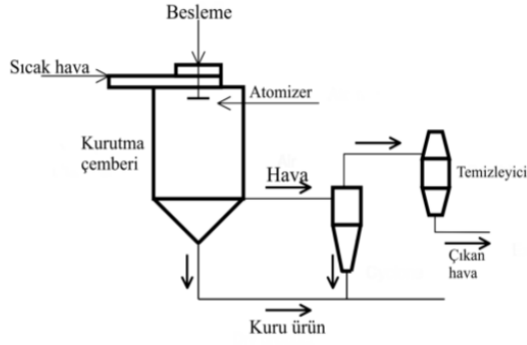
Ürün yüklü vagonlar ile sıcak havanın aynı yönde hareket ettiği tünellere “paralel akış tüneli” denir. Yani paralel akış tüneline sıcak hava ile kurutulacak ürün, aynı yerden tünele girmektedir. Tipik bir paralel akış tüneli Şekil 3.9’ da gösterilmiştir [46].

Sıcak hava ile vagonların hareketinin birbirine zıt yönde olduğu tünellere “zıt akış tüneli” denir. Bu tip tünellerde sıcak ve kuru hava, önce en fazla kurumuş olan ürünle temas ederken; gittikçe soğuyarak nemi artan hava, son defa en ıslak ürünle temas ederek sistemden çıkar [56].

Tünel kurutucular sürekli sistemler olup büyük ölçekli kurutma işlemleri için önemlidir. Sisteme ürün yükleme ve boşaltma işlemleri için ciddi iş gücü gerektirir ve küçük ölçekli kurutma işlemleri için uygun değildir [49].

3.7.4 Sprey Kurutucular

Spreyle kurutma, bir süspansiyonun veya çözeltinin kuru toz ürüne dönüştürülmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Spreyle kurutmada süspansiyon veya çözelti atomize edilir ve oluşan damlacıklar sıcak bir gazla temas eder. Damlacıklar ve ısıtılmış gaz temas ettiğinde, damlacıklar içindeki çözücü buharlaşarak kuru bir toz ürün elde edilir. Püskürtmeli kurutucular, diğer yöntemlere kıyasla ürünü çok hızlı kurutabilir ve bir çözeltiyi tek adımda kurutulmuş toza dönüştürebilir [57].



Şekil 3.9 Püskürtmeli Kurutucunun Şematik Gösterimi[88]

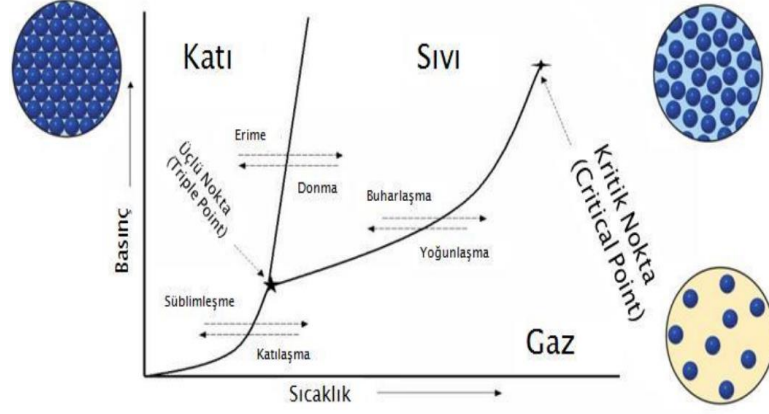
Bir püskürtmeli kurutucu, besleme pompası, atomizer, hava ısıtıcı, hava dağıtıcı, kurutma odası ve egzoz havası temizleme ve toz geri kazanım kısımlarından oluşur [57].

- ✓ Hava ısıtıcı: Hava ısıtıcılar, fan, hava filtresi gibi farklı ekipmanlar ile birlikte kullanılabilir.
- ✓ Atomizer: Son üründe istenen partikül boyutuna göre farklı şekil ve çapta olabilir. Beslenen çözeltinin düzgün bir şekilde püskürtülmesini sağlar.
- ✓ Kurutma haznesi: Kurutulacak ürün ile sıcak havanın temas ettiği kısımdır.

Sprey kurutucular, gıda endüstrisinde süt tozu, kuru krema, hazır çorbalar gibi farklı ürün gruplarının üretiminde kullanılan, lezzet kaybını minimize eden önemli bir kurutma yöntemi olup özellikle farmasötik alanda, sıcaklığa duyarlı ürünlerin kurutulmasında tercih edilen önemli bir yöntemdir [57].

3.7.5. Dondurarak Kurutma

Dondurarak kurutma, çok düşük basınçta, donmuş gıdalardan veya donmuş çözeltilerden, bağlı suyun süblimasyonla uzaklaştırılması işlemidir. Süblimleşme şartlarını belirlemek için, suyun denge faz diyagramı kullanılır. Denge faz diyagramı (üçlü nokta), farklı fazların (katı, sıvı, gaz) dengede olduğu basınç ve sıcaklığı gösterir. Bu diyagram ile suyun süblimleşmesi için gerekli sıcaklık ve basınç değerleri belirlenir [58].



Şekil 3.10Denge Faz Diagramı [90]

Şekilde gösterildiği gibi maddenin katı halden sıvı hale geçmesi erime, sıvı halden katı hale geçmesi donma, sıvı halden gaz haline geçmesi buharlaşma, gaz halinden sıvı hale geçmesine yoğunlaşma denir. Dondurarak kurutma işleminde önemli olan katı halden gaz haline geçiş yani süblimasyon olayı olup, bunun tersi gaz halinden katı hale geçiş olayına ise desorpsiyon (çökme) denir. Dondurarak kurutma işlemi aşağıdaki safhalardan meydana gelir [58]:

- ✓ Dondurma safhası
- ✓ Birinci kurutma periyodu
- ✓ İkinci kurutma periyodu

Dondurma safhasında, kurutulacak gıda maddeleri veya çözeltiler, içerdikleri çözücünün tamamı donana kadar soğutulur. Hızlı dondurma işleminde, küçük buz kristalleri oluşur. Bunları dondurarak ürünü kurutmak zordur fakat küçük buz kristallerinin süblimasyonu materyalin yapısına hemen hemen hiç zarar vermez. Yavaş dondurma işleminde ise büyük buz kristalleri elde edilir. Büyük buz kristallerini dondurarak kurutmak, küçük buz kristallerine kıyasla daha kolaydır. Fakat materyal yapısında bozulmalar olabilir [58].

Birinci kuruma periyodunda, süblimasyon olayı ürün yüzeyinde gerçekleşir. Süblimasyon ile materyalden uzaklaştırılan ve kurutma hücrelerine yayılan su buharı vakum vasıtası ile yoğunlaştırıcıya taşınır. Böylece kurutma hücrelerinde buhar basıncı çözücünün süblimasyonunu sağlayacak şekilde düşük olur. Kısa bir

zaman içinde süblimasyon oranı hızlı artış gösterir. Süblimasyon sonucu kuruyan ve hala donmuş halde olan tabaka arasında bir ara yüzey oluşur. Kuruyan alandaki gözeneklerin buhar akışına karşı oluşturduğu direnç süblimasyon oranını azaltır. Serbest suyun tamamen süblime olduğu anda birinci kurutma periyodu sona erer. Birinci kurutma periyodu bittiğinde materyaldeki nem miktarı, %7- 8 civarındadır [59].

İkincil kurutma periyodunda, donmamış bağlı su uzaklaştırılır [58]. Birincil kurutma sonrası başlayan bu evrede üründeki nem seviyesinin optimum seviyeye getirilmesi istenir. İkincil periyotta ortam sıcaklığı, ürün hassasiyeti ile uyumlu olarak biraz daha yükseltilir. Basınç ve toplayıcı sıcaklığı gibi parametreler sabit kalır [60].

İdeal bir dondurarak kurutma işleminde ikinci kurutma periyodu hemen birinci kurutma periyodunun sonunda başlar. Buradaki ideal kelimesi, iyi tasarlanmış bir dondurarak kurutma işleminde birinci kurutma periyodu boyunca yalnız donmuş suyun süblimasyonla uzaklaştırılmasını, ikinci kurutma periyodu boyunca da yalnız bağlı suyun uzaklaştırılmasını temsil eder. Fakat gerçekte dondurarak kurutma sistemlerinde, az da olsa bir miktar bağlı suda, birinci kurutma periyodu süresince kurutulacak maddeden uzaklaştırılır. Sonuç olarak, ideal olmasa da birinci kurutma periyodu süresince bir miktar ikinci kurutma da oluşmaktadır. Dondurarak kurutma sistemlerinde, kurutulacak madde içerisindeki bütün donmuş çözücünün süblimasyonla uzaklaştırıldığı an (birinci kurutma periyodunun sonu) ikinci kurutma periyodunun başlangıcı olarak kabul edilir. Böylece, ikinci kurutma periyodu boyunca kurutulacak maddeden yalnızca bağlı haldeki su uzaklaştırılır [60].

Dondurularak kurutulmuş besinler, beslenme kalitelerini, tatlarını, şekillerini ve büyüklüklerini büyük ölçüde korur ve diğer yöntemler ile kurutulmuş gıdalardan farklı olarak, çok hızlı bir şekilde yeniden su alma özelliğine sahip olurlar[61].

3.7.6 Vakumlu Kurutma

Vakumlu kurutma yapan kurutucular, ısıya duyarlı ürünlerin, düşük sıcaklıklarda hızla kurumasını sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Katı ürünlerin yanı sıra sıvı

veya püre formundaki ürünlerin kurutulmasında da yaygın olarak kullanılır [27]. Vakumlu kurutma, ortam basıncını düşürerek ısıya duyarlı ürünlerin daha düşük sıcaklıklarda kurutulmasını sağlar. Isı genellikle oyuk raflardan buhar veya sıcak su geçirilerek sağlanır. Kurutma sıcaklıkları dikkatlice kontrol edilebilir ve kurutma döngüsünün büyük bir kısmında sıcaklık, uzaklaştırılmak istenen çözücünün kaynama noktası altında kalır. Kuruma süreleri uzundur, genellikle 12 ila 48 saat arasındadır [62].

Kurutucuların çoğu, hem buharlaşma için ısı sağlamak hem de buharlaşan nemi üründen uzaklaştırmak için sıcak havanın doğrudan (konvektif) kullanıldığı tiptedir. Isının ürün yüzeyine sıcak hava ile doğrudan uygulandığı sistemlerin aksine vakum kurutucuda buharlaştırma ısı, sabit veya hareketli olan ısıtılmış yüzeyler ile dolaylı olarak veya radyasyon ile sağlanır. Bu kurutucularda kurutma vakum yardımı ile gerçekleştirilir. Vakum hücresinin içindeki hava bir vakum pompası veya buhar enjektörü yardımıyla emilerek 2.5×10^{-3} - 7×10^{-3} bar basınçta vakum ortamı oluşturulur. Vakum pompalı kurutucularda, buharlaşan nem, bir yoğuşturucuda sıvı hale dönüştürüldükten sonra vakum hücresi dışına atılır. Buhar enjektörlü vakum kurutucularda ise yoğuşturucuya gerek duyulmaz[62].



Şekil 3.11 Pilot ölçekli vakumlu kurutucu [24]

Vakum işleminin kurutmaya nasıl yardımcı olabileceğini anlamak için, basitleştirilmiş bir kurutma teorisini temsil eden aşağıdaki denklemden yararlanılabilir.

$$Q = U \times A \times \Delta T \quad (3.5)$$

Burada; Q; sistemde gerçekleşen net ısı transferi (W), U; ısı transfer katsayısı (W/m^2K°), A; ısı transfer yüzey alanı (m^2), ΔT ; sıvının kaynama sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki farktır (K°). Kurutma işleminde amaç ürünlerdeki sıvının buharlaşması için etkin bir ısı transferi sağlamaktır. Malzemenin özellikleri ve kurutucu tipi U ve A değerlerini belirlerken işlemin verimlilik hedefi olan Q değerinin artması için ΔT değerinin artması gerekir. Vakum kurutucularda ortam basıncının düşürülmesi ile sıvının kaynama noktası düşürülür ve böylece ΔT ve Q değeri artmış olur [62].

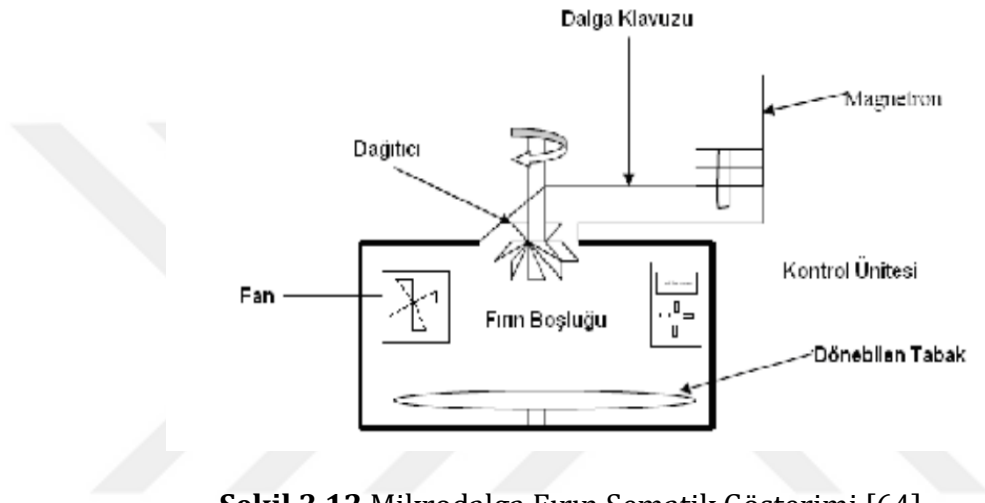
Tepsili vakum kurutucular, ağırlıklı olarak sıcaklığa ve oksijene duyarlı olan ürünlerin kurutulması için kullanılır. En sık kullanılan bu tip vakumlu kurutucularda ısıtma plakaları üzerinde bulunan, ürünün yerleştirildiği tepsiler vardır. Tepsiler arasındaki mesafe ürünün yükleme kolaylığına göre belirlenebilir. Kurutma sırasında üretilen buhar doğrudan veya bir buhar püskürtme kompresörü vasıtasıyla alınır. Yoğuşmayan buhar, vakum sistemi tarafından çıkarılır [61].

Vakumlu kurutucularda sistem içerisinde az miktarda hava olması ürünleri oksidasyon tehlikesine karşı korur. İşlem sırasında uygulanan sıcaklıklar çok yüksek olmadığı için ürün üzerinde sert kabuk oluşumu gözlenmez ve bu da ürünün iç kısımlarında kuruma oluncaya kadar nem difüzyonunun devam etmesini sağlar. Kesikli bir proses olan vakumlu kurutma işleminde ürünün yükleme ve boşaltılması için tecrübeli işgücü gerekir. Sınırlı bir kapasiteye sahip olan vakumlu kurutucularda ısı transfer katsayısı düşüktür. Kurulum maliyetinin yüksek olması nedeni ile özellikle ilaç gibi sektörlerde tercih edilir [27].

3.7.7 Mikrodalga Kurutma

Mikrodalgalar, 1 milimetre ile 1 metre arasında değişen, dalga boyuna sahip olan elektromanyetik dalgalardır. Bu mikrodalgaların frekansı 0,3 GHz ve 3 GHz arasındadır. Mikrodalgalar, radyo dalgalarından daha fazla frekansa sahiptir, ışığın hızında, havada ve uzayda yayılırlar. Mikrodalga fırınları, mikrodalga fırının çalışmasının daha iyi anlaşılması için elektromanyetik kuvvet alanları olarak da

kabul edilebilir. Mikrodalgalar, iyonik parçaların göçü ve/veya dipolar parçaların rotasyonu ile molekülleri hareket ettirir [63]. Mikrodalga ile bir malzemeyi ısıtma işlemi, malzemenin harcama faktörü ile değişir. Bu faktör malzemenin, dielektrik kaybının, dielektrik sabitine oranıdır. Dielektrik sabiti, malzemenin mikrodalga enerjisini alıkoyma yeteneğinin bir ölçüsü olarak ifade edilir. Kayıp faktörü ise giren mikrodalga enerjisinin malzemede ısı olarak tüketerek kaybolma miktarının ölçüsüdür. Yani yüksek kayıp faktörlü malzemeler mikrodalga enerjisi ile daha kolay ısıtılır [61].



Şekil 3.12 Mikrodalga Fırın Şematik Gösterimi [64]

Mikrodalga fırının önemli bileşenleri; mikrodalga üreten bir magnetron, üretilen mikrodalganın fırın içinde yayılmasını sağlayan bir dalga yayıcı ve fırın boşluğudur. Mikrodalganın fırın içine homojen yayılmasını sağlamak için döner tabla veya dalga yayıcı pervane kullanılmaktadır. Ayrıca ısınan gıdadan kaynaklı sıcak havanın fırın içinde birikmesini önlemek için bir havalandırma sistemi vardır [64].

Geleneksel kurutma işlemlerinde, ürünün kurutulması için gerekli ısı enerjisi, konveksiyon, kondüksiyon ve radyasyon olmak üzere üç farklı şekilde sağlanmaktadır. Mikrodalga işleminde ise ısı üretimi maddedeki polar moleküller sayesinde gerçekleşir. Mikrodalga kurutma sisteminde ürün içindeki polar su molekülleri, mikrodalgaları absorbe eder. Almış olduğu bu enerji sonucunda su moleküllerinin birbirine sürtünmesi ile ısı enerjisi açığa çıkar ve tüm kütle

ısınması sağlanır. Isı direkt ürün içerisinde olduğu için ürün içerisindeki nem çok kısa sürede ısınır. Ürünün iç ve dış kısmında oluşan, nemin gıdadan hızlıca uzaklaşmasını sağlayan buhar basıncı farkı, nem transferinin içten dışa hızlıca gerçekleşmesini sağlar [63]. Bununla birlikte, gıda malzemelerindeki su molekülleri, proteinler, lipitler ve lifler gibi diğer daha büyük moleküller tarafından bağlandığından, mikrodalga enerji emilim mekanizması oldukça karmaşıktır. Tadı ve rengi bakımından istenen kalitede kurutulmuş balık elde etmek için, özellikle mikrodalga gücü ve boşlukta hava ve nem dolaşımı dikkatlice kontrol edilmelidir [23].

Mikrodalga fırınlarda elektromanyetik alanlarla ilgili her türlü hesaplamada Maxwell eşitlikleri kullanılır. Bu eşitlikler, manyetik alanın zaman ve mekanda nasıl hareket ettiğini açıklar. Bir gıda maddesinin mikrodalga enerjisi ile ısıtılması, ısıtma ekipmanları ve gıda maddesinin aşağıda sıralanan özelliklerine bağlıdır [65].

Frekans: Mikrodalgalarda kullanılan frekanslar ve dalga boyları endüstriyel, bilimsel ve tıbbi amaçlar doğrultusunda sınırlandırılmıştır. Gıda sanayisinde mikrodalga kullanım frekansları, 2450 ± 50 MHz ve 915 ± 15 MHz olarak uygun bulunmuştur [66].

Mikrodalga Gücü ve Isıtma Hızı: Endüstride kullanılan mikrodalga sistemleri 5-100 kW arasında değişen güç değerlerinde çalışmaktadır. Sistemin gücü arttıkça, aynı miktardaki kütleyi ısıtma hızı da artar. Buna bağlı olarak gıdanın ısıtılma süresi azalır[65].

Su İçeriği: Su molekülleri, mikrodalga enerjisinin gıdalar tarafından absorbe edilmesini sağlar. Gıda içerisinde bulunan su moleküllerinin fazla olması, polarize olacak içerik miktarının artması dolayısı ile o gıdanın dielektrik kayıp faktörünün büyümesini sağlar. Dolayısıyla gıdanın ısınması daha kolay olacaktır.[65]

Gıdanın Kütlesi: Gıdanın kütlesi ile istenilen ısıtmanın gerçekleşmesi için gerekli olan mikrodalga gücü doğrudan ilişkilidir. Büyük cisimler, küçük cisimlere kıyasla daha fazla mikrodalga gücü absorbe ederken, mikrodalga fırın içerisinde ısıtılması

daha uzun sürer. Eğer toplam kütle az ise kesikli bir sistem tercih edilir. Kütle arttıkça, bantlı sistemlerin kullanımı daha uygun olur.[65].

Dielektrik Özellikler: Dielektrik özellikler, dielektrik ısıtma sırasında elektromanyetik enerjinin hangi ölçüde bağlanacağını ve ısıya dönüştürüleceğinin gösterir. Dielektrik sabiti (ϵ') ve dielektrik kayıp faktörü (ϵ''), gıdaların dielektrik özelliklerini belirleyen parametrelerdir. Dielektrik sabiti, gıdada ne kadar enerjinin saklanabileceğini, dielektrik kayıp faktörü ise malzemenin bu enerjiyi ısıya dönüştürme kabiliyetini gösterir. Materyalin dielektrik kayıp faktörünün dielektrik sabitine oranı (ϵ''/ ϵ') kayıp tanjant ($\tan \delta$) olarak ifade edilir. Kayıp tanjant, elektromanyetik alanda gıda maddesince absorplanan mikrodalga enerjisinin ısıya çevrilen miktarını gösterir Materyalin dielektrik sabiti ve kayıp faktörü; uygulanan elektrik alanının frekansına, su içeriğine ve sıcaklığına, bağlıdır[82].

Sıcaklık: Sıcaklık maddenin dielektrik özelliklerine dolayısı ile mikrodalga enerji sonucu ısınmasına etki eder. Bunun için gıda maddesinin başlangıç sıcaklığı bilinmelidir. Artan sıcaklık sonrası suyun viskozitesinde azalma ve buna bağlı iyon hareketliliğinde artış görülür[82].

Gıdaların başlangıç sıcaklığı ne kadar yüksek ise mikrodalga ile ısıtılmaları o kadar hızlı olur.

Polarizasyon: Elektrik dipolü aralarında mesafe bulunan zıt yüklü iki molekülü ifade eder. Biyolojik birçok materyalde ana bileşen olan su polar özelliklidir. Mikrodalga alan içinde kalan dipol momente sahip su molekülleri hızla yer değiştirmeye başlar. Moleküllerin arasında bu dönme hareketi sonucu sürtünme olur ve dipol polarizasyon olarak adlandırılır yani malzeme kutuplu hale gelir [81].

Gıda endüstrisinde kullanımı giderek artan mikrodalga ısıtmanın birçok avantajı vardır. Geleneksel ısıtma yöntemlerinden farklı olarak mikrodalga yöntemi ile kurutmada ısınma, numunenin içinde başlar ve bu da kurutma süresinin kısalmasını, zaman ve gereksiz enerji kaybının önlenmesini sağlar. Geleneksel sistemlere kıyasla daha az yer kaplar ve kullanımı kolaydır. Yapılan çalışmalar vitamin ve mineral kayıplarının daha az olduğu göstermektedir [83].

4.1 Materyal

Deneyde İstanbul' da bir süpermarketten satın alınan levrek balıkları kullanılmıştır. Balıklar, deneyler yapılincaya kadar +4°C' de buzdolabında saklanmıştır.

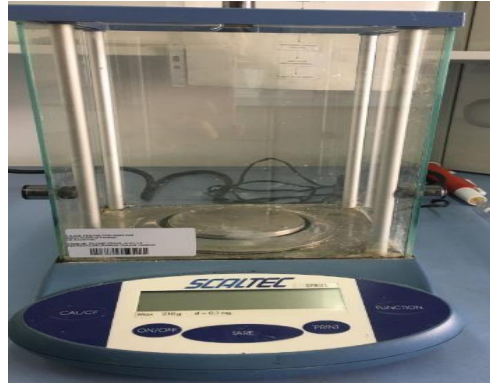


Şekil 4.1 Deneylerde Kullanılan Levrek Balıkları

4.2 Kullanılan Cihazlar

4.2.1 Hassas Terazi

Tartım işlemleri için Şekil 4.2' de gösterilen Scaltec marka SPB31 model terazi kullanılmıştır.



Şekil 4.2 Hassas Terazi

4.2.2 Mikrodalga Fırın

Kurutma deneylerinde Bosch HMT72G420 marka, en fazla 800 W çalışma gücüne sahip ve 2450 MHz çalışma hızında mikrodalga fırını kullanılmıştır. İstenilen sıcaklık, cihaz üzerinde bulunan kontrol panelindeki dijital sıcaklık göstergesinden ayarlanabilmektedir.



Şekil 4.3 Mikrodalga Fırın

4.2.3 Vakum Etüvü

Deneylerde Nuve marka, EV-018 model vakum etüvü kullanılmıştır.



Şekil 4.4 Vakum Etüvü

4.3 Metot

4.3.1 Nem Tayini

Deney için hazırlanan levrek balığı numunesi, kuru madde miktarını belirlemek için etüvde 24 saat süre ile tutulmuştur. Hesaplamalar sonucunda nem miktarı, %72.44(yaş baz) olarak hesaplanmıştır.

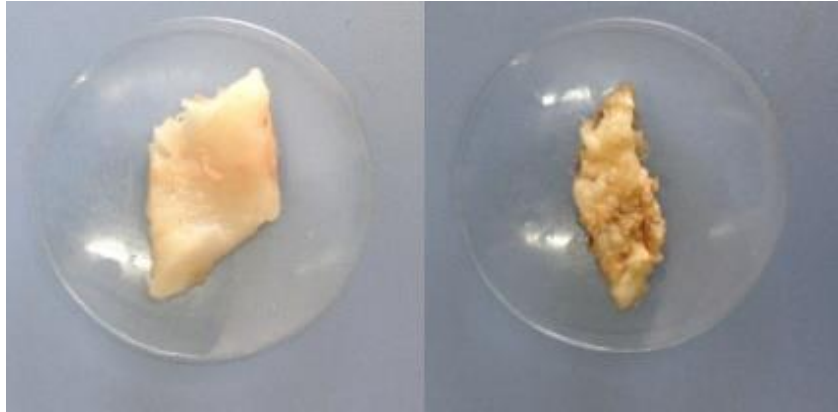
4.3.2 Kurutma İşlemine Hazırlık

Deneylerden önce levrekler, oda sıcaklığına gelinceye kadar desikatörde bekletilmiştir. Deneyde kullanılmak üzere levreğin kılçıksız kısımlarından yaklaşık 1.5 cm kalınlığında dilimler kesilerek numuneler hazırlanmıştır. Darası alınan petri kabı ağırlığı ve üzerine bir parça levrek dilimi konulan petri kabı ağırlığı ölçülmüş, aradaki farktan numune ağırlığı hesaplanmıştır.

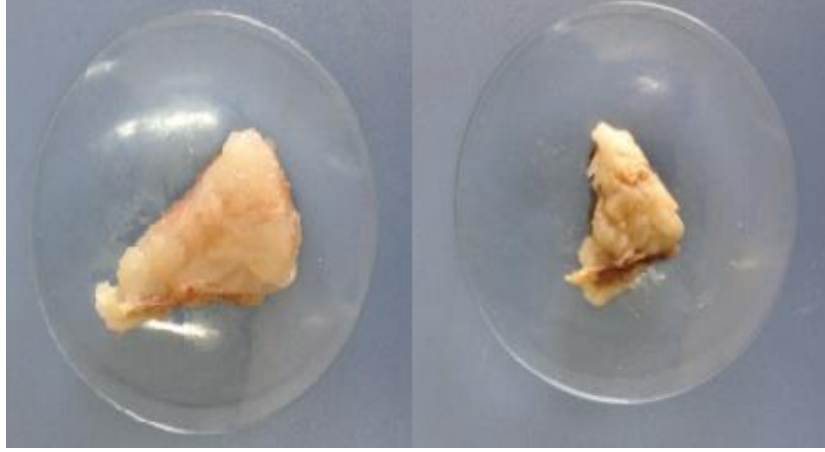
4.3.3 Kurutma İşlemleri

4.3.3.1 Mikrodalga Fırında Kurutma

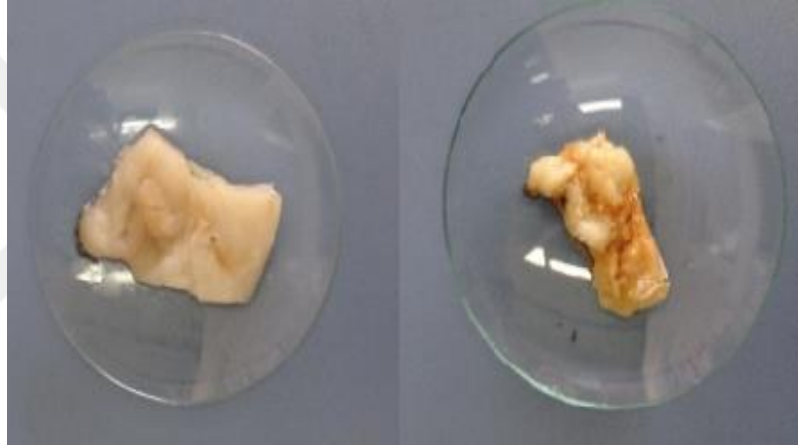
Levrek balığı dilimleri, mikrodalga fırınında sırasıyla 90 W, 180 W ve 360 W güç değerlerinde kurutulmuştur. 90 W için 60 sn ve 180 W için 45 sn, 360 W için 30 sn aralıklarla sabit tartıma ulaşınca kadar ölçüm alınmıştır. Levrek balığı dilimlerinin kurutmadan önce ve sonraki görüntüleri aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.5 Levrek Balığı Dilimlerinin Mikrodalga Fırında 90 W Güç Değerinde Kurutma Öncesi ve Sonrası Görüntüsü



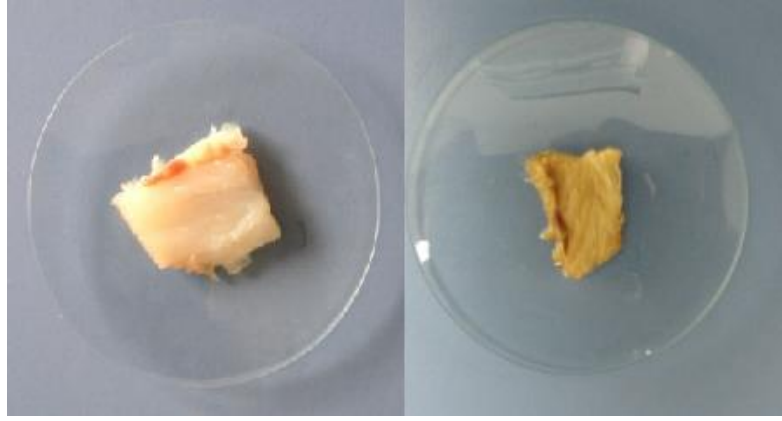
Şekil 4.6 Levrek Balığı Dilimlerinin Mikrodalga Fırında 180 W Güç Değerinde Kurutma Öncesi ve Sonrası Görüntüsü



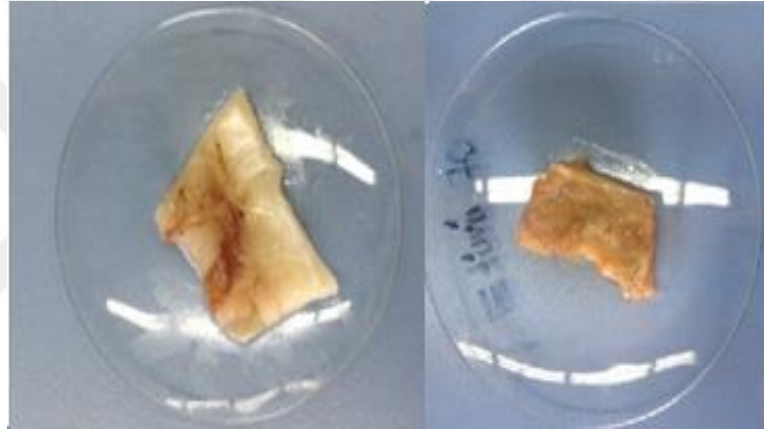
Şekil 4.7 Levrek Balığı Dilimlerinin Mikrodalga Fırında 360 W Güç Değerinde Kurutma Öncesi ve Sonrası Görüntüsü

4.3.3.2 Vakum Etüvünde Kurutma

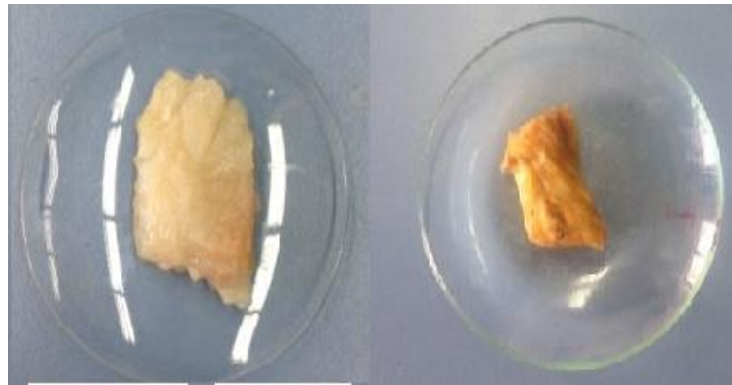
Levrek balığı dilimleri, vakum etüvünde sırasıyla 60 °C, 70 °C ve 80 °C sıcaklık değerlerinde kurutulmuştur. Her bir sıcaklık için 30 dk aralıklarla sabit tartıma ulaşıncaya kadar ölçüm alınmıştır. Levrek balığı dilimlerinin kurutmadan önce ve sonraki görüntüleri aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.8 Levrek Balığı Dilimlerinin Vakum Etüvünde 60 °C' de Kurutma Öncesi ve Sonrası Görüntüsü



Şekil 4.9 Levrek Balığı Dilimlerinin Vakum Etüvünde 70 °C' de Kurutma Öncesi ve Sonrası Görüntüsü



Şekil 4.10 Levrek Balığı Dilimlerinin Vakum Etüvünde 80 °C' de Kurutma Öncesi ve Sonrası Görüntüsü

4.4 Matematiksel Modelleme

Ürünün nem içeriği; başlangıç ve son kütle değerleri kullanılarak kuru baza göre aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanmıştır.

$$M = \frac{m_w}{m_d} \quad (4.1)$$

Bu eşitlikte (4.1); M, nem içeriğini (kg su/kg kuru madde), m_w numune içerisinde bulunan su miktarını (kg), m_d ise kuru madde miktarını (kg) temsil eder [67].

$$DR = \frac{m_{T+dt} - m_T}{d_t} \quad (4.2)$$

Eşitlik (4.2)' de, DR kurutma hızı (kg su/ kg kuru madde x dak), m_{T+dt} , $t+dt$ 'deki nem içeriğini (kg su/kg kuru madde), m_t t anındaki nem içeriği (kg su/kg kuru madde), t, kurutma zamanını (dak) belirtmektedir [68].

$$MR = \frac{m_T - m_e}{m_i - m_e} \quad (4.3)$$

MR: Nem oranı (birimsiz)

Mt: Herhangi bir t anındaki nem içeriği (g su / g kuru madde)

Me: Denge anındaki nem içeriği (g su / g kuru madde)

Mi: Başlangıçtaki nem içeriği (g su / g kuru madde)

Gıdaların sıcak hava ile kurutulması işleminde kullanılan eşitlik (4.3)' de; Me değeri, Mt ve M_0 ile kıyaslandığında çok küçük olduğu için hesaplamalarda Me değerinin sıfır alınabileceği belirtilmektedir [69].

DeneySEL veriler kullanılarak nem içeriği ile kurutma süresi arasında bir ilişki sağlanması amacıyla literatürde gıda ürünleri için kullanılan 9 farklı kurutma modeli uygulanmıştır.

Tablo 4.1 Kuruma eğrilerinin modellenmesinde kullanılan denklemler

| Model | Denklem |
|------------------|---------------------------------------|
| Aghlasho et al. | $MR = \exp(-k_1 x t / 1 + k_2 x t)$ |
| HendersonvePabis | $MR = a x \exp(-k x t)$ |
| Jena | $MR = a x \exp(-k x t + b^{0.5}) + c$ |
| Lewis | $MR = \exp(-k x t)$ |
| Logarithmic | $MR = a x \exp(-k x t) + c$ |
| Midilli | $MR = a x \exp(-k x t^n) + b x t$ |
| Parabolik | $MR = a x b + t + c x t^2$ |
| Wang | $MR = 1 + a x t + b x t^2$ |
| Weibull | $MR = a - b x \exp[-(k x t^n)]$ |

4.4.1 Regresyon analizi

Regresyon analizlerinde Statistica programı kullanılmıştır. Regresyon katsayısı (R^2), ürünlerin kuruma eğrilerini tanımlayan denklemi seçmek için ana kriter olarak kabul edilmiştir. Ayrıca kullanılan denklemin uygunluğu için, Khi-kare (χ^2) ve tahmini standart hatası (RMSE) değerleri hesaplanmıştır [70,71].

$$R^2 \equiv 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N MR_{\text{exp},i})^2} \quad (4.4)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{N - z} \quad (4.5)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.6)$$

Yukarıdaki denklemlerde ((4.4), (4.5), (4.6)) M_{exp} ve M_{pre} , tahmin edilen ve deneysel nem oranlarını belirtirken, deneysel veri sayısı N , kullanılan denklemlerdeki katsayısı sayısı ise n olarak ifade edilmektedir. Uygun model için

istenen, tahmini standart hatasına ait değerin sifira yakın olmasıdır. Azalan hız periyodunda kurutma karakteristikleri, Fick'in II. difüzyon eşitliği kullanılarak açıklanmaktadır. Bu eşitlik, difüzyon katsayısı ve sıcaklığın sabit olduğu varsayılarak çözülmüştür. [46].

Nem difüzyonunun açıklanması için aşağıda verilen Fick'in II. difüzyon eşitliği (4.7) kullanılmaktadır [76].

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff} \frac{\partial M}{\partial x} \right) \quad (4.7)$$

Kurutma işleminde, gıdadan nemin difüzyonu incelenirken, ürün dokusunun bozulmadığı ve nemin yalnızca difüzyon ile ortamdan uzaklaştığı varsayımlarıyla eşitlik (4.8) kullanılır. [77].

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{a^2 \alpha_n^2} \exp \frac{Ka^2 \alpha_n^2 t}{\pi^2} \right] \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{4}{(2n+1)^2} \exp \left[-K(2n+1)^2 t \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right] \right] \quad (4.8)$$

Eşitlik (4.8)' in ilk terimi yeniden düzenlenerek boyutsuz nem oranı, eşitlik (4.9) ile logaritmik olarak ifade edilmiştir [72,73,77].

$$\ln(MR) = \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \right) - \frac{D_{eff} \times \pi^2}{a^2} \times \left(\frac{a}{l} \right)^2 \times t \quad (4.9)$$

Ayrılabilir nem oranı değerlerinin logaritmasının zamana karşı grafiğinden elde edilen doğrunun eğimi kullanılarak D_{eff} değerleri eşitlik (4.10) ile hesaplanabilmektedir. Bu denklemde K, doğrunun eğimini göstermektedir [74].

$$K = \left[\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \right] \quad (4.10)$$

Efektif difüzyon katsayısı ile sıcaklık arasındaki bağ, Arrhenius eşitliği (4.11) ile ifade edilir ve bu eşitlik yardımı ile aktivasyon enerjisi hesaplanmaktadır [75].

$$D_{eff} = D_0 \exp \left(- \frac{E_a}{R(T + 273.15)} \right) \quad (4.11)$$

Eşitlik (4.11)' de;

D_0 ; Sonsuz sıcaklıktaki difüzyon katsayısına eşdeğer sabit (m^2 / s)

R: Evrensel gaz sabiti (kJ/mol K)

EA: Aktivasyon enerjisi (kJ/mol)

T: Kurutma sıcaklığıdır (C°).

Mikrodalga fırında kurutma işleminde sıcaklığın direkt olarak ölçülmesi mümkün olmadığı için Arrhenius eşitliği, mikrodalga fırın gücü ve numune kütlesine bağlı olarak yeniden eşitlik (4.12) şeklinde düzenlenmiştir[75].

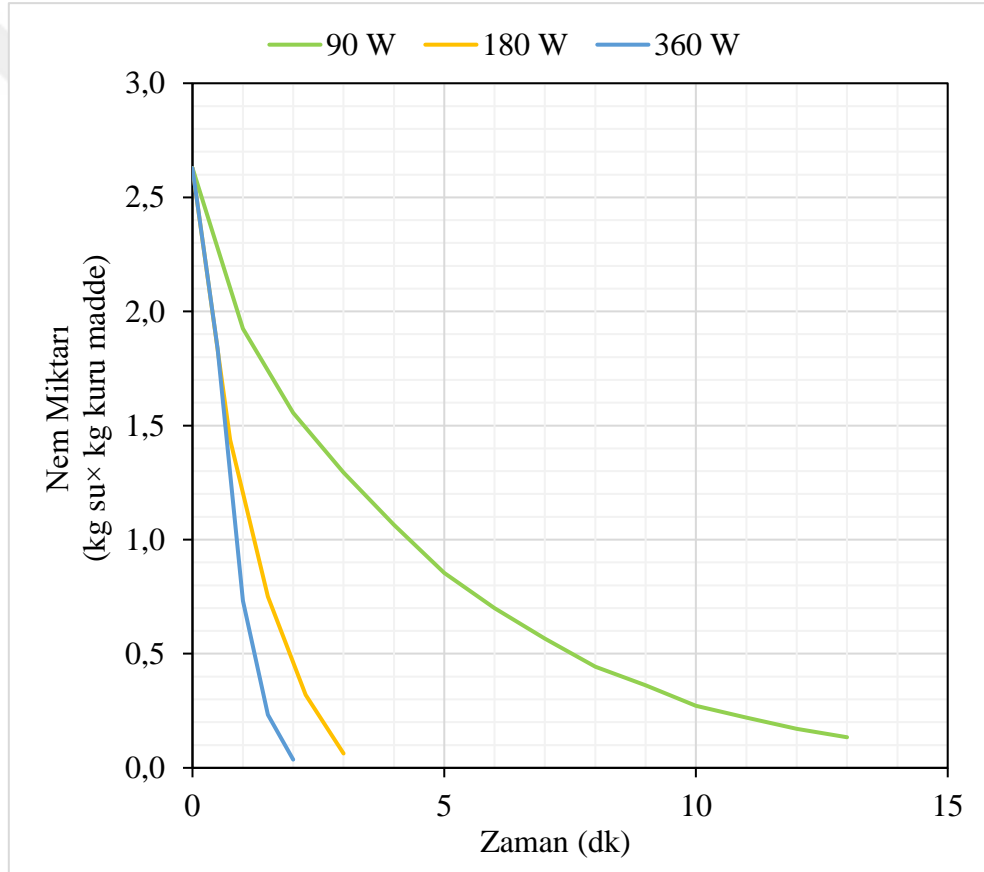
$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a \cdot x_m}{P}\right) \quad (4.12)$$

Denklikte (4.12), her iki tarafın logaritması alınarak hesaplanan (D_{eff}) değerlerine karşılık m/P değerleri ile oluşturulan grafiğin eğiminden aktivasyon enerjisi (kJ/kg) hesaplanmıştır [75]

5.1 Kurutma Eğrileri

5.1.1 Nem İçeriği

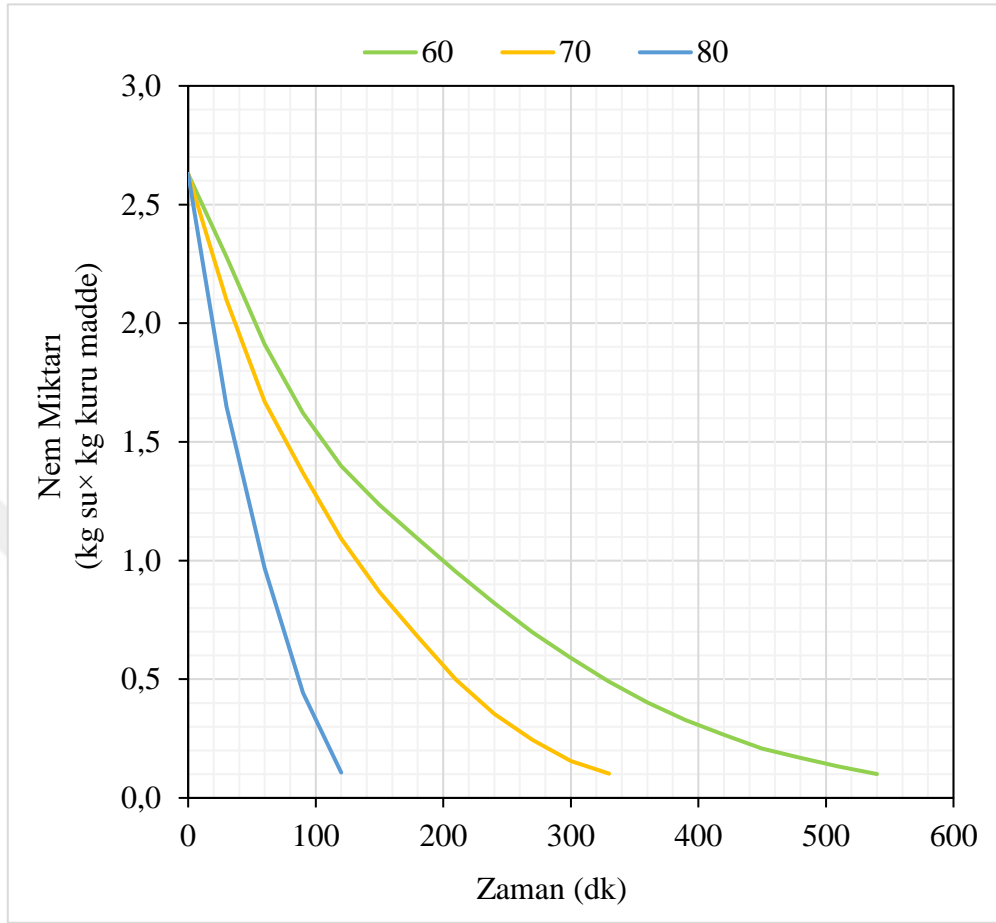
Yapılan deneyler sonucunda; mikrodalga fırın ve vakum etüvü için nem miktarının zaman ile değişimi aşağıdaki grafiklerde (Şekil 5.1 ve Şekil 5.2) gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Mikrodalga Fırında Farklı Güç Değerlerindeki Kurutma Eğrileri

Mikrodalga fırında kurutulan levrek balığı dilimlerinin başlangıçta nem oranı, 2.63 kg su/kg kuru maddedir ve bu değer 90 W,180 W ve 360 W için sırasıyla 0,13; 0,06ve 0,04'e düşmüştür. Grafiklerden elde edilen sonuçlar daha önce yapılmış et

kurutma çalışmalarıyla benzerlik göstermiştir. Güç arttırıldıkça kurutma süresinin ve nem oranının düştüğü; kuruma oranının yükseldiği gözlemlenmiştir.



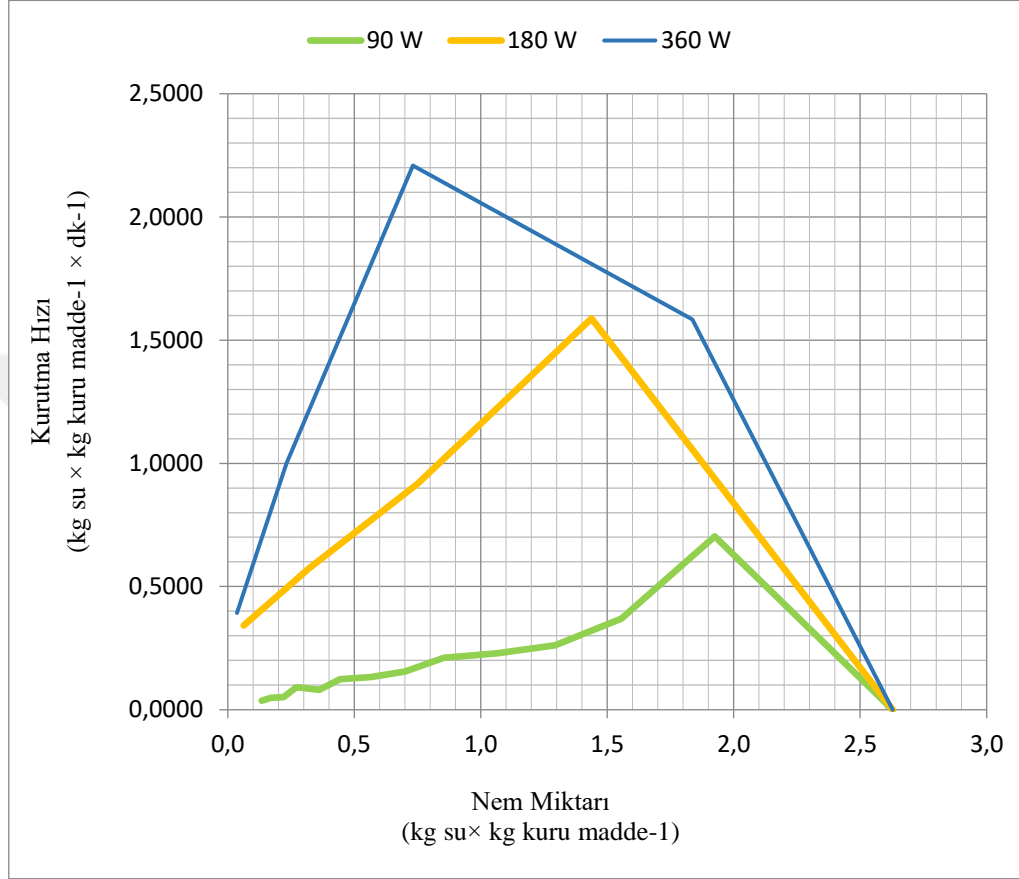
Şekil 5.2 Vakum Etüvünde Farklı Sıcaklık Değerlerindeki Kurutma Eğrileri

Vakum etüvünde benzer şekilde kurutulan levrek balığı dilimlerinin başlangıçta nem oranı, 2.63 kg su/kg kuru maddedir ve bu değer 60 °C, 70 °C ve 80 °C için sırası ile 0,101,0.102, 0.107 değerine düşmüştür. Mikrodalga fırında güç arttırıldığında; vakum etüvünde ise sıcaklık artışına bağlı olarak kuruma süreleri kısalmıştır.

Mikrodalga fırında istenen nem değerine ulaşmak için geçen en kısa ve en uzun süre sırası ile 2 dk ve 13 dk olur iken aynı nem içeriği ve kalınlıktaki levrek balığı dilimlerinin vakum etüvünde istenen nem değerine gelmesi için en kısa ve en uzun süreler, 120 dk ve 540 dk olarak belirlenmiştir.

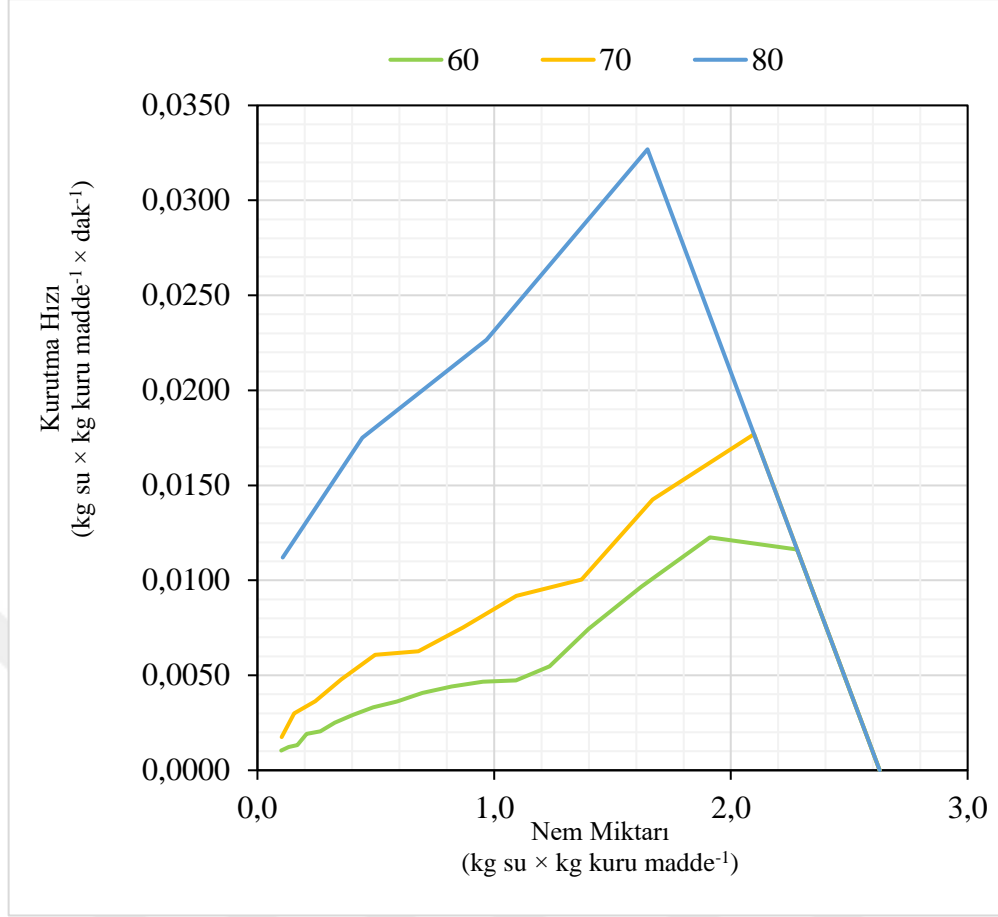
5.1.2 Kurutma Hızı

Mikrodalga fırında ve vakum etüvünde kurutulan levrek balığı dilimlerinin kuruma hızlarının, zamana bağlı olarak hesaplanmış olan nem oranları ile değişimi aşağıdaki şekillerde grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.3 Farklı Güç Değerlerinde Mikrodalga Fırında Kurutulan Levrek Balığı Dilimlerine ait Kuruma Hızı Değerlerinin Nem İçeriği ile Değişimi

Mikrodalga fırında farklı güç değerlerinde kurutma sonucu elde edilen, Şekil 5.3 ile gösterilen kurutma hızı grafiklerinde, artan hızda kuruma periyodu ve azalan hızda kuruma periyodu olmak üzere 2 farklı kuruma periyodu olduğu gözlemlenmiştir.



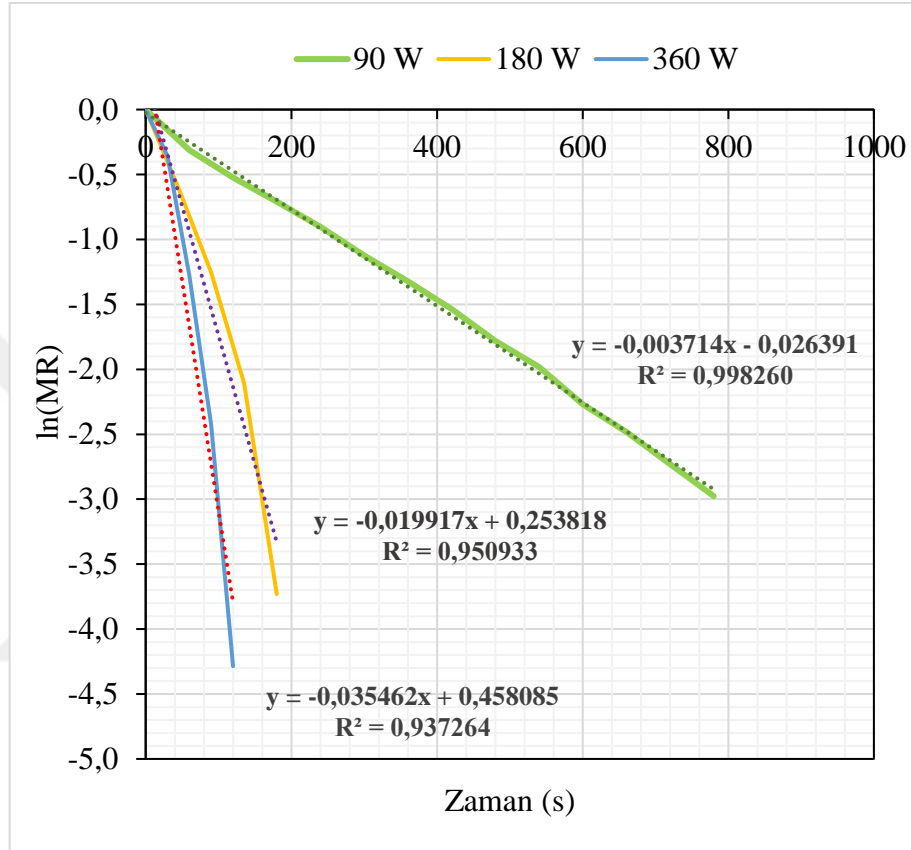
Şekil 5.4 Farklı Sıcaklık Değerlerinde Vakum Etüvünde Kurutulan Levrek Balığı Dilimlerine ait Kuruma Hızı Değerlerinin Nem İçeriği ile Değişimi

Vakum etüvünde farklı sıcaklık değerlerinde kurutma sonucu elde edilen, Şekil 5.4 ile gösterilen kurutma hızı grafiklerinde, benzer şekilde artan hızda kuruma periyodu ve azalan hızda kuruma periyodu olmak üzere 2 farklı kuruma periyodu olduğu gözlemlenmiştir.

Malzemenin nem içeriği, kurutmanın ilk aşaması sırasında çok yüksek olduğu için daha yüksek bir nem difüzyonu gerçekleşmiştir. Dolayısı ile yüksek kurutma oranları gözlemlenmiştir. Kurutma ilerledikçe, ürünlerdeki nem kaybının azalmasına bağlı olarak kuruma hızında bir düşüş gözlemlenmiştir. Ayrıca yüksek mikrodalga güç değerlerinde ve yüksek sıcaklıklarda daha yüksek kuruma oranları elde edilmiştir. Bu nedenle, mikrodalga çıkış gücünün ve sıcaklığın kuruma hızı üzerinde önemli etkisi olduğu söylenebilir.

5.1.3 Efektif Difüzyon Katsayıları

Her iki metot için Eşitlik (4.9) ile elde edilen doğal logaritmik boyutsuz nem oranı ($\ln(MR)$) değerlerine karşılık, kurutma süresi (t) grafiği çizildiğinde elde edilen doğrunun eğiminden De_{eff} değerleri her iki metot sonucu elde edilen veriler ile hesaplanmıştır. Bu nedenle öncelikle nem oranı eğrileri çizilmiştir.



Şekil 5.5 Mikrodalga Fırında Kurutma Sonucu Zamana Bağlı Nem Oranı Eğrileri

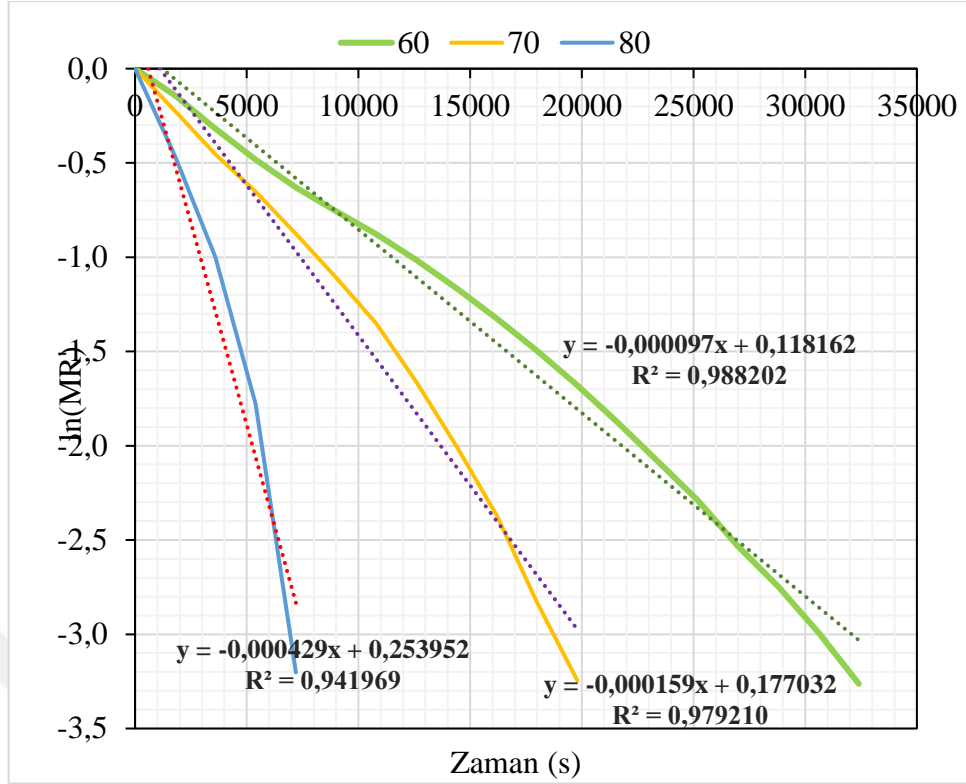
Nem oranı eğrilerden mikrodalga fırın için 90 W güç değerinde R^2 değerinin 1'e yakın olduğu gözlenmiştir.

Mikrodalga fırın verileri için nem oranı eğrisi denklemleri:

$$\ln(MR) = -0,003714x - 0,026391 \quad (90 \text{ W için})$$

$$\ln(MR) = -0,019917x + 0,253818 \quad (180 \text{ W için})$$

$$\ln(MR) = -0,035462x + 0,458085 \quad (360 \text{ W için})$$



Şekil 5.6 Vakum Etüvünde Kurutma Sonucu Zamana Bağlı Nem Oranı Eğrileri

Nem oranı eğrilerden vakum etüvü için 60 °C sıcaklıkta R² değerinin 1'e yakın olduğu gözlenmiştir.

Vakum etüvü verileri için nem oranı eğrisi denklemleri:

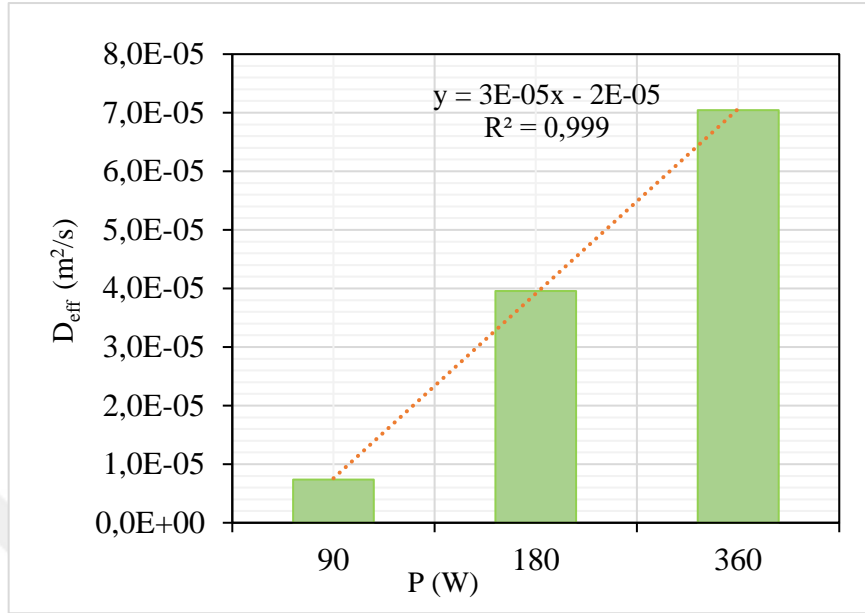
$$\ln(MR) = -0,000097x + 0,118162 \quad (60 \text{ °C için})$$

$$\ln(MR) = -0,000159x + 0,177032 \quad (70 \text{ °C için})$$

$$\ln(MR) = -0,000429x + 0,253952 \quad (80 \text{ °C için})$$

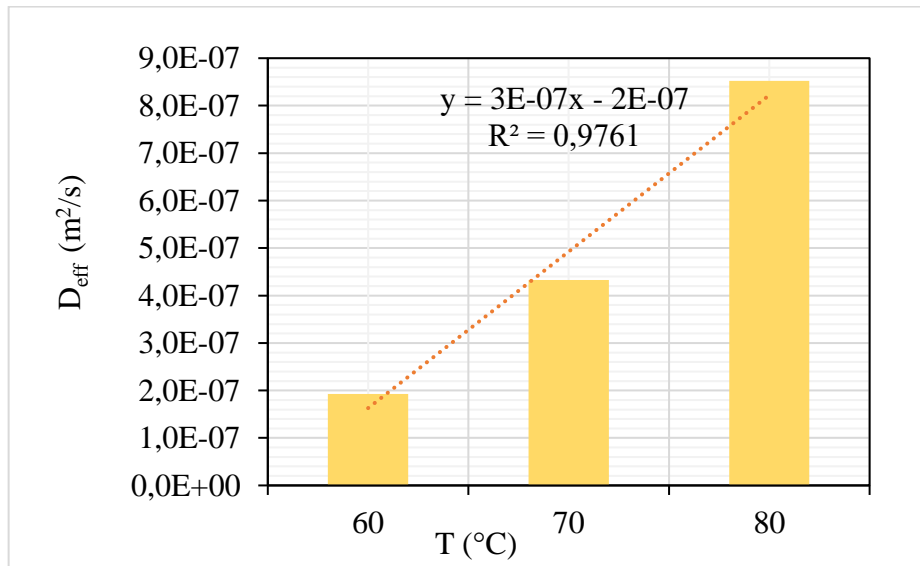
Gıdaların kurutulması sırasında meydana gelen kütle transferini tanımlayan difüzyon katsayısı değerlerinin mikrodalga fırında güç ile; vakum etüvünde ise sıcaklık ile orantılı olarak arttığı ve mikrodalga fırında kurutma sonucu daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yüksek kurutma gücü ve yüksek sıcaklık değerlerinin ürün içerisindeki nemin daha kolay buharlaşmasını ve dolayısı ile kuruma süresini kısaltarak kuruma hızının arttırdığı söylenebilir.

Mikrodalga fırında gerçekleştirilen kurutma deneyleri sonucu elde edilen efektif nem difüzyon katsayıları 90 W, 180 W ve 360 W güç değerleri için sırası ile $7,38 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $3,96 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $7,04 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.7 Mikrodalga Fırın için Hesaplanan Deff Değerleri Grafiksəl Gösterimi

Vakum etüvünde gerçekleştirilen kurutma deneyleri sonucu elde edilen nem difüzyon katsayıları 60 °C, 70 °C, 80 °C için sırası ile $1,93 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $4,12 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $8,52 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak hesaplanmıştır.



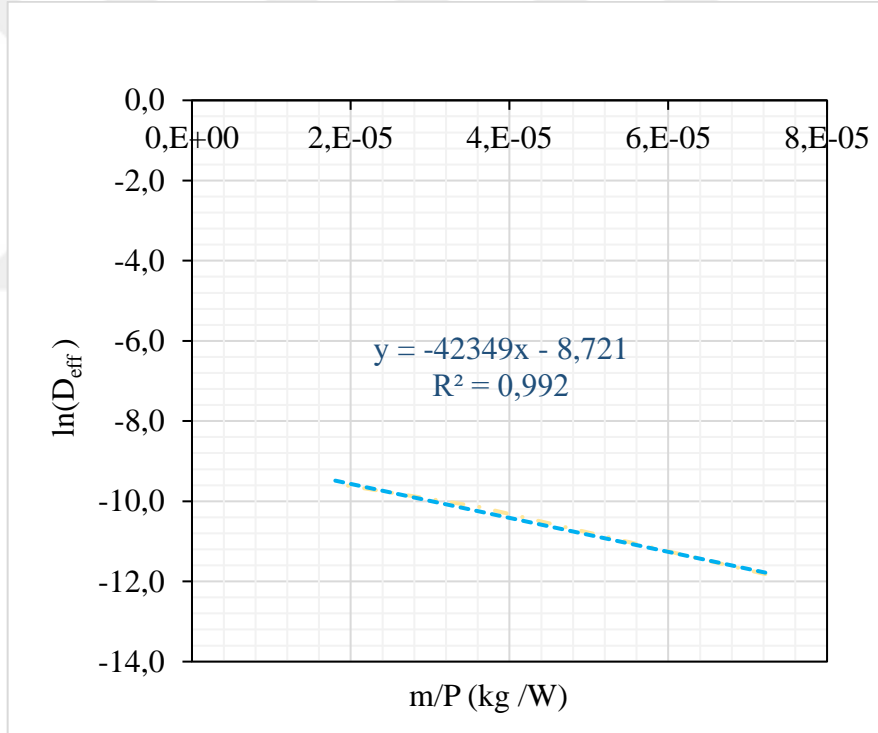
Şekil 5.8 Vakum Etüvü için Hesaplanan Deff Değerleri Grafiksəl Gösterimi

5.1.4 Aktivasyon Enerjileri

Kurutma sürecinde aktivasyon enerjisi, su moleküllerinin ürün yapısından ayrılması için gerekli minimum enerji miktarının göstergesidir. Kurutma işleminde aktivasyon enerjisinin düşük olması üründen su moleküllerinin kolayca ve kısa sürede uzaklaştırılabileceğinin göstergesidir[80].

Mikrodalga fırında kurutma işleminde, numunenin iç sıcaklığı ölçülebilir bir değişken olmadığı için aktivasyon enerjisi, difüzyon katsayısı ile mikrodalga gücünün, örnek kalınlığına oranı ile hesaplanmıştır.

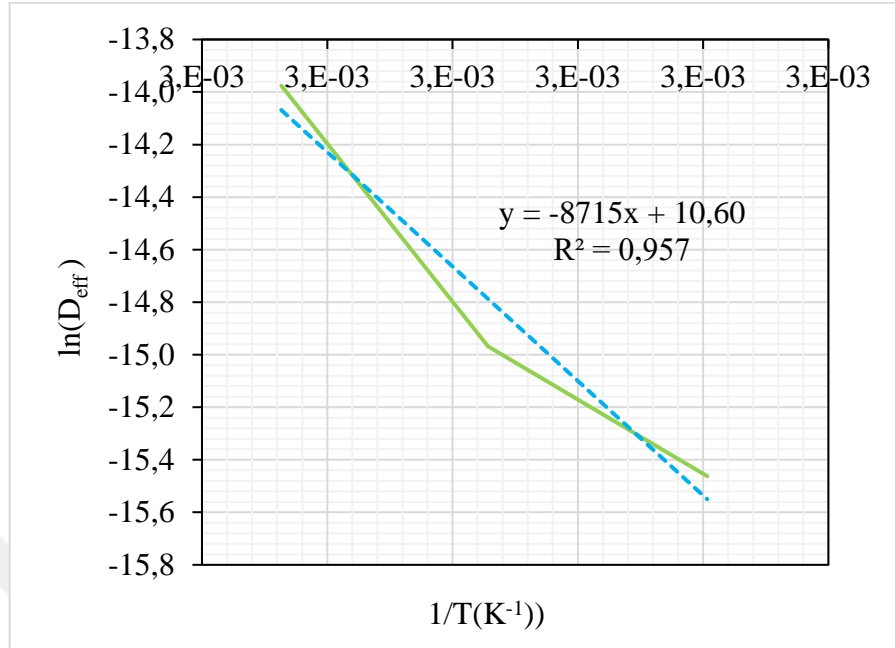
Kurutulan üründe nem difüzyonunu için gerekli enerjinin göstergesi olan aktivasyon enerjisi hesabı için eşitlik (4.12) kullanılarak; $\ln(D_{eff})$ değerlerine karşı m/P grafiği çizilmiştir.



Şekil 5.9 Mikrodalga fırın için $\ln(D_{eff})$ 'in m/P 'ye göre Varyasyonu

Mikrodalga fırın için E_a , Şekil 5.9' da gösterilen grafiğin eğiminden 42,35 kW/kg olarak hesaplanmıştır.

Vakum etüvünde kurutma işlemi için aktivasyon enerjisi hesabında Arrhenius eşitliği (4.11) kullanılarak $\ln D_{\text{eff}}$ değerlerine karşı $1/T$ grafiği çizilmiştir.



Şekil 5.10 Vakum Etüvü için $\ln (D_{\text{eff}})$ 'in $1/T$ 'ye göre Varyasyonu

Vakum etüvü için E_a , Şekil 5.10' da gösterilen grafiğin eğiminden 72.46 kJ/mol olarak hesaplanmıştır.

5.1.5 Matematiksel Modelleme

Kurutma teknolojisinde kurutma işleminin modellenmesi oldukça önemlidir. Kurutma, kararsız ısı ve nem transferinin aynı anda gerçekleştiği karmaşık bir termal işlemdir. Mühendislik açısından bakıldığında, bu karmaşık işlemin kontrol parametrelerinin daha iyi anlaşılması önemlidir. Kurutma işlemlerinin matematiksel modelleri, yeni kurutma sistemlerinin tasarlanması veya geliştirilmesi için, hatta kurutma işleminin kontrolü için kullanılır [1]. Matematiksel modelleme sonucu en uygun kurutma modeli için R^2 , χ^2 ve RMSE değerleri belirleyici parametrelerdir. R^2 değerinin 1'e yakın olması belirleyici ana kriter iken; deneysel değerler ile model ile elde edilen tahmini veriler arasındaki sapmanın göstergesi olan RMSE değerinin en uygun model için en düşük değere sahip olması beklenir. χ^2 değerinin düşük olması modelin uygunluğuna karar vermek için belirleyici olmuştur[70,71,79].

Regresyon analizi sonucu, Tablo 4.1' de gösterilen 9 farklı kurutma modeli uygulanarak, tahmini nem oranı değerleri ve katsayılar her bir sıcaklık ve güç değeri için bulunmuş ve en uygun model seçimine karar verilmiştir.

Tablo 5.1 Mikrodalga Fırın için Farklı Kurutma Modellerinden Elde Edilen Tahmini Katsayılar ve İstatiksel Veriler

| Matematiksel Modeller | Katsayılar | Güç (W) | | |
|-----------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | | 90 | 180 | 360 |
| Aglobasho | k1 | 0,253539 | 0,713734 | 0,253539 |
| | k2 | 0,016429 | -0,113659 | 0,016429 |
| | R ² | 0,995917 | 0,999241 | 0,994521 |
| | χ^2 | 0,000358 | 0,000155 | 0,005716 |
| | RMSE | 0,017510 | 0,009646 | 0,058563 |
| Jena | a | 0,304219 | 2,347961 | 0,272890 |
| | k (s ⁻¹) | 0,185356 | 1,147088 | 2,777736 |
| | b (s ^{-0.5}) | -0,097184 | 0,315580 | 1,463227 |
| | c | 1,184707 | -0,854261 | 1,298403 |
| | R ² | 0,998668 | 0,997479 | 0,999416 |
| | χ^2 | 0,000140 | 0,000449 | 0,000414 |
| | RMSE | 0,009999 | 0,015795 | 0,009097 |
| Wang | a | -0,173539 | -0,640648 | -0,854718 |
| | b | 0,008074 | 0,106548 | 0,175873 |
| | R ² | 0,967944 | 0,997000 | 0,986503 |
| | χ^2 | 0,002809 | 0,005836 | 0,003189 |
| | RMSE | 0,049064 | 0,067370 | 0,043745 |
| Henderson and Pabis | A | 0,962751 | 1,010987 | 1,048263 |
| | K | 0,221598 | 0,880617 | 1,242749 |
| | R ² | 0,996106 | 0,994158 | 0,954631 |
| | χ^2 | 0,000341 | 0,000764 | 0,010721 |
| | RMSE | 0,017100 | 0,024372 | 0,080204 |
| Lewis | K | 0,230603 | 0,872322 | 1,195801 |
| | R ² | 0,993954 | 0,993944 | 0,950930 |
| | χ^2 | 0,000489 | 0,00092 | 0,008697 |
| | RMSE | 0,021307 | 0,0272566 | 0,083411 |

Tablo 5.1 Mikrodalga Fırın için Farklı Kurutma Modellerinden Elde Edilen Tahmini Katsayılar ve İstatiksel Veriler (Devamı)

| | | | | |
|--------------------|----------------|-----------|-----------|-----------|
| Parabolic | a | 0,910590 | 0,986544 | 1,030036 |
| | b | -0,147108 | -0,625022 | -0,907036 |
| | c | 0,006443 | 0,102689 | 0,195251 |
| | R ² | 0,983485 | 0,997333 | 0,987940 |
| | χ^2 | 0,001579 | 0,004971 | 0,004275 |
| | RMSE | 0,035218 | 0,057566 | 0,041351 |
| Logarithmic | A | 0,955491 | 1,116675 | 1,411857 |
| | k | 0,229044 | 0,685337 | 0,677069 |
| | c | 0,011378 | -0,117576 | -0,386420 |
| | R ² | 0,996237 | 0,999956 | 0,982808 |
| | χ^2 | 0,000360 | 0,000482 | 0,006094 |
| | RMSE | 0,016808 | 0,017924 | 0,049371 |
| Weibull | a | 4,240665 | 1,183482 | 0,883157 |
| | b | 0,896381 | 1,178233 | 1,769584 |
| | R ² | 0,997797 | 0,998105 | 0,999845 |
| | χ^2 | 0,000193 | 0,000228 | 0,000073 |
| | RMSE | 0,012861 | 0,013317 | 0,006609 |
| Midilli | a | 0,743083 | 0,999944 | 1,001045 |
| | k (s-1) | 0,000000 | 0,750282 | 1,264140 |
| | n | 0,000000 | 0,989521 | 1,785435 |
| | b (s-1) | -0,063355 | -0,028301 | 0,002936 |
| | R ² | 0,999447 | 0,999986 | 0,999863 |
| | χ^2 | 0,000058 | 0,000008 | 0,000069 |
| | RMSE | 0,006438 | 0,000968 | 0,006211 |

Mikrodalga kurutma davranışını incelemek için en uygun olan kurutma modeli her bir güç değeri için aşağıdaki veriler doğrultusunda belirlenmiştir:

90 W için;

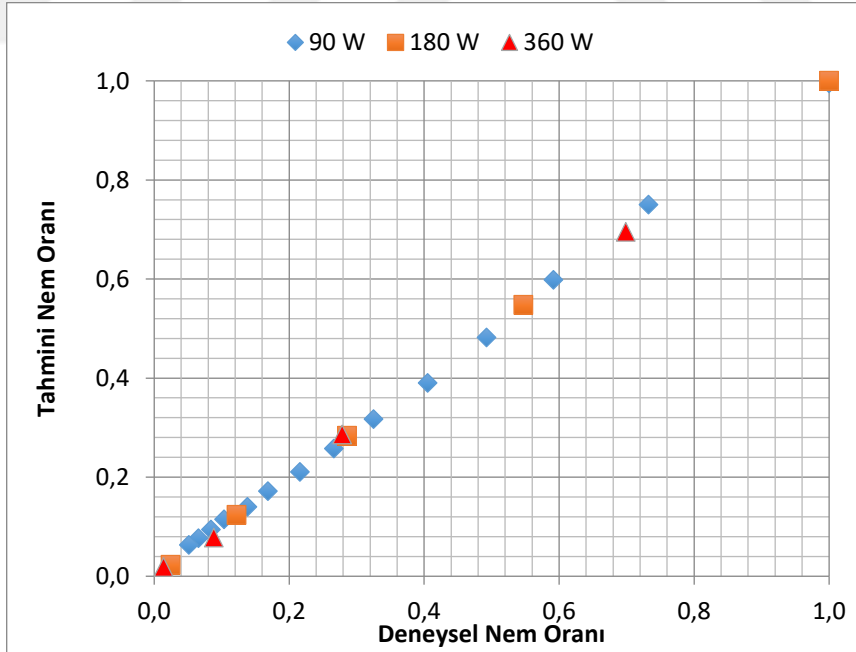
Çizelgede gösterilen R^2 , χ^2 ve RMSE değerleri sırasıyla; 0,931946-0,999447; 0,000058-0,002809; 0,0064386-0,049064 arasındadır. Bu sonuçlara göre 90 W en uygun kurutma modeli Midilli olup, bu model ile en yüksek R^2 , en düşük χ^2 ve RMSE değerleri elde edilmiştir.

180 W için;

Çizelgede gösterilen R^2 , χ^2 ve RMSE değerleri sırasıyla; 0,993944-0,999986; 0,000008-0,005836; 0,000968-0,027256 arasındadır. Bu sonuçlara göre 180 W en uygun kurutma modeli Midilli olup, bu model ile en yüksek R^2 , en düşük χ^2 ve RMSE değerleri elde edilmiştir.

360 W için;

Çizelgede gösterilen R^2 , χ^2 ve RMSE değerleri sırasıyla; 0,950930-0,999863; 0,000069-0,010721; 0,006211-0,083411 arasındadır. Bu sonuçlara göre 360 W en uygun kurutma modeli Midilli olup, bu model ile en yüksek R^2 , χ^2 ve en düşük RMSE değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5.11 Mikrodalga Fırında Elde Edilen Deneysel Veriler ile Midilli Modeli Kullanılarak Hesaplanan Tahmini Nem Oranı Değerleri Grafikselleştirilmesi

Tablo 5.2 Vakum Etüvü için Farklı Kurutma Modellerinden Elde Edilen Tahmini Katsayılar ve İstatiksel Veriler

| Matematiksel Modeller | Katsayılar | Sıcaklık (°C) | | |
|--------------------------------|------------|---------------|-----------|-----------|
| | | 60 | 70 | 80 |
| Aglobasho | k1 | 0,005068 | 0,006724 | 0,013152 |
| | k2 | 0,000023 | -0,000794 | -0,003869 |
| | R2 | 0,998215 | 0,998743 | 0,999223 |
| | χ^2 | 0,000182 | 0,000133 | 0,000152 |
| | RMSE | 0,012767 | 0,010535 | 0,009544 |
| Jena | a | 0,00000 | 0,716974 | 0,934196 |
| | k (s-1) | 0,00490 | 0,008849 | 0,026794 |
| | b (s-0.5) | -0,00197 | 0,013168 | 0,066071 |
| | c | 16,86907 | 0,325754 | 0,066647 |
| | R2 | 0,998295 | 0,996155 | 0,994577 |
| | χ^2 | 0,000275 | 0,000509 | 0,558714 |
| | RMSE | 0,0147288 | 0,018429 | 0,334279 |
| Wang | a | -0,004269 | -0,005902 | -0,013307 |
| | b | 0,000005 | 0,000009 | 0,000045 |
| | R2 | 0,992033 | 0,994819 | 0,999522 |
| | χ^2 | 0,001121 | 0,000549 | 0,000093 |
| | RMSE | 0,0316682 | 0,021394 | 0,007483 |
| Henderson And Pabis | A | 0,996129 | 1,015556 | 1,021582 |
| | K | 0,005019 | 0,007899 | 0,018512 |
| | R2 | 0,997156 | 0,994836 | 0,985256 |
| | χ^2 | 0,000251 | 0,000547 | 0,186238 |
| | RMSE | 0,0149861 | 0,021358 | 0,334279 |
| Lewis | K | 0,005042 | 0,007777 | 0,018151 |
| | R2 | 0,997134 | 0,994465 | 0,984359 |
| | χ^2 | 0,000239 | 0,000533 | 0,002295 |
| | RMSE | 0,015043 | 0,022112 | 0,042844 |

Tablo 5.2 Vakum Etüvü için Farklı Kurutma Modellerinden Elde Edilen Tahmini Katsayılar ve İstatiksel Veriler(Devamı)

| | | | | |
|--------------------|----------------|-----------|-----------|-----------|
| Parabolic | a | 0,968364 | 0,965925 | 0,994755 |
| | b | -0,003957 | -0,005508 | -0,013155 |
| | c | 0,000005 | 0,000008 | 0,000044 |
| | R ² | 0,992574 | 0,996822 | 0,999575 |
| | χ^2 | 0,000696 | 0,000374 | 0,000124 |
| | RMSE | 0,024216 | 0,016754 | 0,007056 |
| Logarithmic | A | 1,035851 | 1,094960 | 1,299941 |
| | k | 0,004566 | 0,006290 | 0,011208 |
| | c | -0,047482 | -0,102629 | -0,300116 |
| | R ² | 0,998657 | 0,999560 | 0,999898 |
| | χ^2 | 0,000126 | 0,000052 | 0,000030 |
| | RMSE | 0,010296 | 0,006232 | 0,0034561 |
| Weibull | a | 1.958898 | 1.303186 | 56,81542 |
| | b | 1,0280 | 1,0992 | 1,29132 |
| | R ² | 0,997391 | 0,997085 | 0,996502 |
| | χ^2 | 0,000230 | 0,000309 | 0,000684 |
| | RMSE | 0,014352 | 0,016046 | 0,020259 |
| Midilli | a | 1,004769 | - | 0,999763 |
| | k (s-1) | 0,007182 | - | 0,012326 |
| | n | 0,918808 | - | 1,028592 |
| | b (s-1) | -0,000123 | - | -0,001208 |
| | R ² | 0,999231 | - | 0,999876 |
| | χ^2 | 0,000077 | - | 0,140368 |
| | RMSE | 0,007788 | - | 0,007483 |

Vakum etüvünde kurutma davranışını incelemek için en uygun olan kurutma modeli her bir sıcaklık değeri için aşağıdaki veriler doğrultusunda belirlenmiştir.

60 °C için;

Çizelgede gösterilen R², χ^2 ve RMSE değerleri sırasıyla; 0,992033-0,99231; 0,000077-0,163887; 0,007788-0,031668 arasındadır. Bu sonuçlara göre 60 °C en

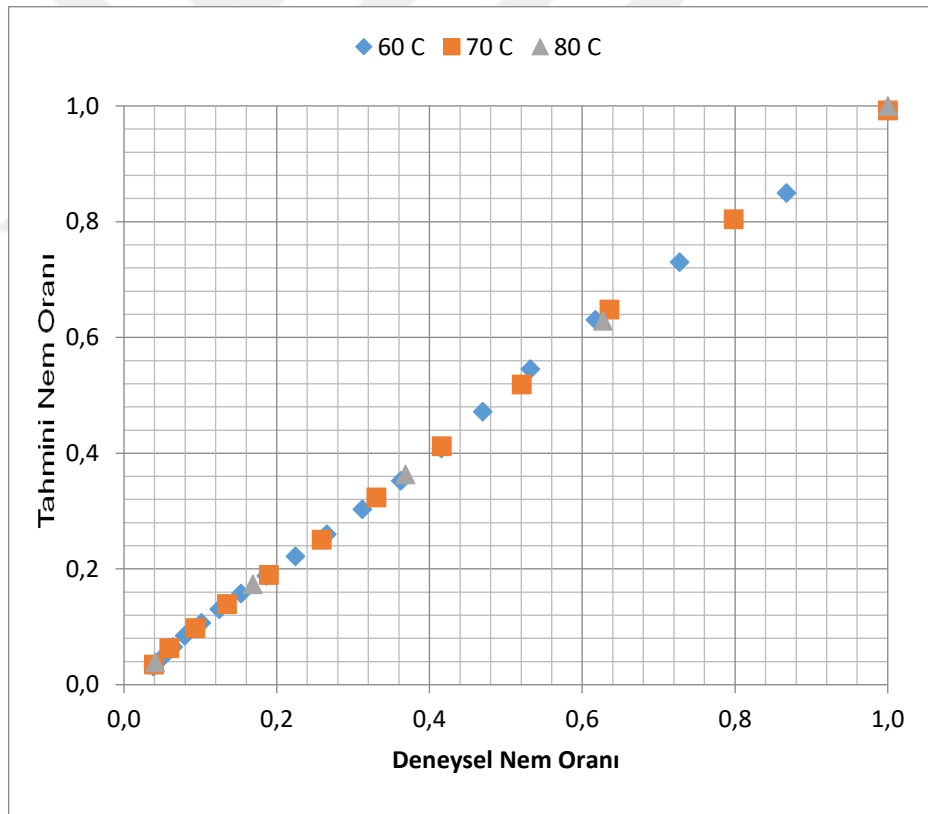
uygun kurutma modeli Midilli olup, bu model ile en yüksek R^2 , en düşük χ^2 ve RMSE değerleri elde edilmiştir.

70 °C için;

Çizelgede gösterilen R^2 , χ^2 ve RMSE değerleri sırasıyla; 0,994465- 0,998743; 0,000052-0,175846; 0,006232-0,022112 arasındadır. Bu sonuçlara göre 70 °C en uygun kurutma modeli Logarithmic olup, bu model ile en yüksek R^2 , en düşük χ^2 ve RMSE değerleri elde edilmiştir.

80 °C için;

Çizelgede gösterilen R^2 , χ^2 ve RMSE değerleri sırasıyla; 0,984359-0,999898; 0,000030-0,186238; 0,003456-0,334279arasındadır. Bu sonuçlara göre 80 °C en uygun kurutma modeli Logarithmic olup, bu model ile en yüksek R^2 en düşük χ^2 ve RMSE değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5.12 Vakum Etüvünde Elde Edilen Deneysel Veriler ile Midilli (60 °C için) ve Logarithmic (70 °C ve 80 °C için) Modeli Kullanılarak Hesaplanan Tahmini Nem Oranı Değerleri Grafikselsel Gösterimi

Bu çalışmada levrek balığı dilimleri, 60, 70, ve 80 °C' de vakum etüvünde ve 90, 180 ve 360 W güç değerlerinde mikrodalga fırında kurutularak kurutma kinetiği incelenmiş ve doğrusal olmayan regresyon analizine göre kurutma davranışını en iyi ifade eden modeller belirlenmiştir. Levrek balığı dilimlerinin mikrodalga fırın ve vakum etüvünde kurutulması sonucu, farklı güç ve sıcaklık değerlerindeki kuruma süreleri, efektif difüzyon katsayıları ve aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır.

Mikrodalga fırın ve vakum etüvünde kurutulan levrek balığı dilimlerinin nem içeriği değerleri ölçülerek kurutma eğrileri çizilmiş, istenen nem değerine vakum etüvünde en kısa 120 dakikada ulaşılırken mikrodalga fırında 2 dakikada ulaşıldığı belirlenmiştir.

Mikrodalga fırında güç arttıkça kuruma süresi kısalmışken efektif difüzyon katsayı değerleri artmıştır. Efektif nem difüzyon katsayısı, mikrodalga fırında en yüksek $7,04 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, en düşük $7,38 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak hesaplanmıştır. Aktivasyon enerjisi 42,35 kW/kg olarak bulunmuştur. En uygun kurutma modeli her üç güç değeri için de Midilli modeli olmuştur.

Benzer şekilde vakum etüvünde de sıcaklık arttıkça kuruma süreleri kısalmışken efektif difüzyon katsayıları artış göstermiştir. Efektif nem difüzyon katsayısı, vakum etüvünde en yüksek $8,52 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, en düşük $1,93 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak hesaplanmıştır. Arrhenius denklemi ile aktivasyon enerjisi 72.46 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. 70 °C ve 80 °C için en uygun kurutma modeli Logarithmic olurken 60 °C için Midilli modeli olmuştur.

Vakum etüvünde kurutma sonrası elde edilen ürün görüntüsü mikrodalgaya kıyasla renk ve şekil bakımından daha iyi olur iken iki metot için kurutma süreleri kıyaslandığında mikrodalga fırında işlem çok daha kısa sürdüğü gözlenmiştir. Aynı

zamanda efektif difüzyon katsayıları karşılaştırıldığında daha yüksek değerler gözlemlendiği için mikrodalga yöntemin enerji tasarrufu açısından avantajlı olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmanın devamında kurutulmuş levrek balığının besin değerleri ve ağır metal içeriği ölçülebilir ve kurutulmuş bir gıda maddesinin kalitesini belirlemek için önemli bir parametre olan rehidrasyon yeteneği tespit edilebilir. Elde edilen veriler doğrultusunda farklı deniz ürünlerine bu yöntemler uygulanabilir.



- [1] H. Darvishia, M. Azabakht, A. Rezaeiaslb ve A. Farhangc, "Drying Characteristics of Sardine Fish Dried with Microwave Heating", Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, vol:12, no.2, pp.121-127, 2013.
- [2] O. İsmail ve Ö.G. Kocabay, "Infrared and Microwave Drying of Rainbow Trout: Drying Kinetics and Modelling," Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, vol.18, pp: 259-266, 2018.
- [3] Z. Duan, ve M. Zhang, "Characteristics of Microwave Drying of Bighead Carp", International Journal, vol. 23, no.1, pp:637-643, 2005.
- [4] D. Jain ve P.B. Pathare, "Study The Drying Kinetics of Open Sun Drying of Fish", Journal of Food Engineering, vol:78, pp:1315-1319, 2006.
- [5] S.H. Sengar, Y.P. Khandetod ve A.G. Mohod, "Low Cost Solar Dryer for Fish", African Journal of Environmental Science and Technology, vol.3, no.9, pp. 265-271, 2009.
- [6] R.T. Mohd ve P.S., "Microwave Assisted Hot Air Convective Dehydration of Fish Slice: Drying Characteristics, Energy Aspects and Colour Assessment", International Scientific Conference, 14-15 Şubat 2011, Malezya.
- [7] S.S. Marine, M.A. Sayeed, P.P. Barman, R. Begum, M.M. Hossain ve M.T Alam, "Traditional Methods of Fish Drying: an Explorative Study in Sylhet", International Journal of Fishery Science and Aquaculture, vol.2, no.1, pp. 28-35, 2014.
- [8] Alabalık, Levrek ve Çipura Yetiştiriciliği, http://fishfarmeurope.eu/fishfarma/pluginfile.php/2416/mod_page/content/3/e-Book-for-TR-Fish-Farmers.pdf, 10 Nisan 2019.
- [9] A. Babaoğlu ve D.İ. Emiroğlu, "Avrupa Birliği'ne Uyum Sürecinde Deniz Balıkları Yetiştiricilik İşletmelerinin Değerlendirilmesi", Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, vol.33, no.4, pp.321-328, 2016.
- [10] K. Fırat ve Ş. Saka, Levrek (*Dicentrarchus Labrax* Lin., 1758) Balığının Biyolojisi ve Yetiştirme Teknikleri, <http://akualojistik.com/tr/levrek-baliginin-biyolojisi-ve-yetistirme-teknikleri>, 10 Nisan 2019.
- [11] D. Kocatepe ve H. Turan, "Chemical Composition of Cultured Seabass (*Dicentrarchus labrax*, Linnaeus 1758) Muscle, Journal of Food and Nutrition Research, vol:51, no:1, pp:33-39, 2012.
- [12] V.N. Ugochukwu, "Fish Preservation and Processing", Journal of Food, https://www.researchgate.net/publication/316918904_fish_preservation_and_processing, 10 Mayıs 2019.
- [13] M.S. Rahman, Drying of Fish and Seafood, https://www.researchgate.net/publication/265219666_22_Drying_of_Fish_and_Seafood, 10 Mayıs 2019.
- [14] E.A. Dinçer ve M. Erbaş, "Etin Tuzlanması İşleminde Vakumlu Emdirim Tekniğinin Kullanılması", The Journal of Food, vol.43, no.1, pp. 139-150, 2018.

- [15] L.A. Granata, G.J. Flick, R.E. Martin, *The Seafood Industry: Species, Products, Processing and Safety*, Blackwell Publishing Ltd, USA, 2018.
- [16] S.Ö. Doğu ve C. Sarıçoban, "Et Kurutma Teknolojisi ve Dünyada Tüketilen Bazı Kurutulmuş Et Ürünleri", *Journal of Food and Health Science*, vol.1, no.3, pp.109-123, 2015.
- [17] L. Cormick, *Chemical Engineering Design-II*, NPTEL, Module 4, <https://nptel.ac.in/courses/103103027/pdf/mod4.pdf> 1 Mayıs 2019.
- [18] A. Naseer, J. Singh, H. Chauhan, P.G.AAnjum ve K. Harleen, "Different Drying Methods, Their Applications and Recent Advances", *International Journal of Food Nutrition and Safety*, vol.4, no.1, pp. 34-42, 2013.
- [19] B.P. Mishira, J. Mishira, P.K. Pati ve P.K. Rath, "Dehydrated Meat Products- a Review", *International Journal of Livestock Research*, vol.7, no.11, pp.10-22, 2017.
- [20] D. Asioli, C. Rocha, R. Wongprawmas, M. Popa, M.L. Alm, "Microwave Dried or Air-Dried Consumers Stated Preferences and Attitudes for Organic Dried Strawberries", *Food Research International*, vol.120, pp.763-775, 2018.
- [21] G. Bingöl, *Gıda İşlemede Kurutma Teknolojilerinin Temel İlkeleri*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, Gıda Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 2010.
- [22] T. Kovacı, E. Dikmen ve A.Ş. Şahin, "Kurutma Sistemleri, Enerji Tüketimleri ve Ürün Kalitesine Etkileri ve Örnek Sistem Tasarımı", *Teknik Bilimleri Dergisi*, vol.8, no.2, pp.25-39, 2018.
- [23] Ö. Çolak ve N. Güneş, *Gıda Kurutma Sistemlerinin Ekserji Analizi*, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2009.
- [24] M.D. Parikh, M. Dilip, "Solids Drying: Basics And Applications: Several Types of Batch and Continuous Dryer Exist in the CPI For Removing Moisture From Solids", *Chemical Engineering Academic One File*, pp. 42-45, 2014.
- [25] A.S. Mujumdar, *Handbook of Industrial Drying*, Cseslaw Strumillo Lodz Technical University, Poland, 1987.
- [26] B. Cemeroglu, *Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi*, Gıda Teknolojisi Derneği, Ankara, 1986.
- [27] F.H Şahin, *Domates Kurutmada Farklı Yöntemlerin Karşılaştırılması*, Namık Kemal Üniversitesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Makineleri Anabilim Dalı, Tekirdağ, 2010.
- [28] E.A. Dinçer ve M. Erbaş, "Kurutulmuş Et Ürünlerinin Kalite Özellikleri", *The Journal of Food*, vol.44, no.3, pp.472-482, 2019.
- [29] H. Dobooglu, *Liyofilizasyonun Karadut (Morus-Nigra) Kurutmadaki Potansiyelinin Konveksiyonel ve Vakumlu Kurutma Teknikleriyle Kıyaslanarak Belirlenmesi*, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Fakültesi, Kahramanmaraş, 2012.
- [30] T.F. İbicek, *Alternatif Pişirme Yöntemlerinin Araştırılması Ve Yeni Hibrid Yöntem Oluşturulması*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, İstanbul, 2006.

- [31] H. Ercoşkun, S. Işıksal ve M. Kıralan, “Fermente Et Ürünlerinde Lipit Reaksiyonları”, Gıda Mühendisliği Dergisi, pp.38-46, 2004.
- [32] C. Aktaş, Patlıcanın Kurutma ve Rehidrasyon Karakteristiklerinin Belirlenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kimya Mühendisliği, İstanbul, 2015.
- [33] S. Darıcı ve S. Şen ,“Kivi Meyvesinin Kurutulmasında Kurutma Havası Hızının Kurumaya Etkisinin İncelenmesi”, Tesisat Mühendisliği, pp.130. 2012.
- [34] N. Ç. Güneş ve N.Ç., Gıda Kurutma Sistemlerinin Ekserji Analizi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir, 2009.
- [35] J. Troller, Food Preservation by Reducing Water Activity, Acedemic Press, USA, 1978.
- [36] R.D. Andrade, P. Roberto, M. Lemus, E. Carmen, C. Perez, “Models of Sorption Isotherms for Food: Uses and Limitations”, Vitae, vol.18, no.3, pp.325-334, 2011.
- [37] C.J. Geankoplis, Transport Process and Unit Operations, Allynand Bacon Inc., Massachussets, 1993.
- [38] M. Güneş, Bilgisayar Destekli olarak Çeşitli Geometrik Şekillere Sahip Gözenekli Ortamlarda Kurutma Prosesinin İncelenmesi, Balıkesir Üniversitesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Balıkesir, 1994.
- [39] F.B. Silva, F.M. Fakhouri, R.M. Galante, C.M. Antunes, M. Santos, T. Caon ve S.T. Martelli, Drying Kinetics of French Fries Covered with Soy Protein/Starch Edible Coatings, Faculty of Engineering, Federal University of Grande Dourados, MS Brazil, Department of Pharmaceutical Sciences, https://www.researchgate.net/publication/324161313_Effect_of_soy_proteins_tarch_edible_coatings_on_drying_kinetics_of_french_fries, 3 Nisan 2019.
- [40] B.P. Kaur, V.S. Sharanagat, P.K. Nema ve A.S. Mujumdar, Fundamentals of Drying, Drying Technologies For Foods: Fundamentals & Applications, New India Publishing Agency, Hindistan, 2015.
- [41] E. Demiray, Kurutma İşleminde Domatesin Likopen, B-Karoten, Askorbik Asit ve Renk Değişim Kinetiğinin Belirlenmesi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, 2009.
- [42] M.K. Krokida, V.T. Karathanos, Z.B. Maroulisand ve D. Marinos-Kouris, “Drying Kinetics of Some Vegetables”, Journal of Food Engineering, vol.59, pp.391-403, 2003.
- [43] C. Sarsılmaz, Güneş Enerjisi Destekli Kayısı Kurutma Sistemi, Fırat Üniversitesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 1998.
- [44] D.R. Heldman ve R.W. Hartel, Principles of Food Processing (1st Edition), Chapman&Hall Publication, New York, 1997.
- [45] İ. Saldamlı, ve E. Saldamlı,, Gıda Endüstrisi Makinaları, Haccettepe Üniversitesi Yayınları, Ankara, 1990.

- [46] H.A. Bayhan, Kabin Tipi Bir Kurutucuda Kurutma Sürecini Etkileyen Parametrelerin Deneysel Olarak İncelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, , Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 2011.
- [47] Y. Kumar, S. Tiwari, S.A. Belorkar, “Drying: An Excellent Method for Food Preservation”, International Journal of Engineering Studies and Technical Approach, vol. 1, no.8, 2015.
- [48] A. Güngör, N. Özbal, “Endüstriyel Kurutma Sistemleri”, 3. Ulusal Tesisat Mühendisleri Kongresi Bildiriler Kitabı, Kasım 1997, İzmir.
- [49] N.Binti, ve A. Rahman, Continuous Tunnel Dryers, <https://tr.scribd.com/document/232687944/Continuous-Tunnel-Dryer-2014>, 10 Nisan 2019.
- [50] V. Belessiotis ve E. Delyannis, “Solar Drying”, Solar Energy, vol.85, no.8, pp.1665-1691, 2011.
- [51] B. Yelmen, Polietilen Yüksek Tünel Sera Tipi Kurutucuda Baharatlık Kırmızı Biberin Kurutulması, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Makineleri Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Adana, 2010.
- [52] P. Lettieri, D. Macri, “Effect of Process Conditions on Fluidization”, Kona Powder and Particle Journal, vol. 33, no.86, pp.108, 2016.
- [53] R. Çalhan, D. Kaya, G. Tulger ve M. Eyidoğan, “Organik Gübre Kurutma Teknolojileri: Akışkan Yataklı Kurutucular”, TMMOB Mühendis ve Makine Dergisi, vol. 53, no.634, pp.22-33, 2012.
- [54] Z. Deniz, Akışkan Yataklı Kurutucu Modellemesi ve Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Isı Akışkan Programı, İstanbul, 2010.
- [55] A. Güngör, “Sebze ve Meyve Kurutmada Kullanılan Kurutucular ve Kurutma Teknolojileri”, 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 17-20 Nisan 2013, İzmir.
- [56] S. Akdaş, Mandalinaların Farklı Kurutma Şartlarında Biyoaktif Bileşenlerinin Degradasyon Kinetikleri, Yıldız Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği, İstanbul, 2014.
- [57] A. Afoakwa, C. Adomako, J. Owusu, N. Engman ve A. Hannah, “Spray Drying as an Appropriate Technology for the Food and Pharmaceutical Industries a Review”, Journal of Environmental Science, Computer Science and Engineering & Technology, vol.1, no.3, pp.467-476, 2012.
- [58] H. Sadıkoğlu ve M. Özdemir, “Dondurarak Kurutma Teknolojisi ve Evreleri”, Gıda, vol.2, no.6, 643-649, 2003.
- [59] T. Özkara, Dondurarak Kurutma Yöntemi ile Saklanan Greftlerin Mekanik Özellikleri üzerine Radyasyonla Sterilizasyonun Etkileri, İstanbul Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Biyofizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2003.

- [60] A Guide to Freeze Drying for the Laboratory, <https://pim-resources.coleparmer.com/data-sheet/labconco-guide-freeze-dry-in-lab.pdf>, 5 Nisan 2019.
- [61] D.R. Heldman ve D.B. Lund, Handbook of Food Engineering, CRSPress, USA, 2007.
- [62] D.M. Parikh, "Vacuum Drying: Basics and Application, Chemical Engineering"-New York- Mcgraw HillIncorporated then Chemical Week Publishing, vol.122, no.4, pp.48-52, 2015.
- [63] P.P. Sutar, ve S. Prasad, Microwave Drying Technology-Recent Developments and R&D Needs in India, Agricultural and Food Engineering Department, Indian Institute of Technology, Hindistan, 2008.
- [64] S. Karaaslan, Sebze ve Endüstri Bitkilerinin Mikrodalgayla Kurutulması üzerine Çalışmalar, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Makineleri Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Adana, 2008.
- [65] Ü.İ. Konak, M. Certel ve S. Helhel, "Gıda Sanayisinde Mikrodalga Uygulamaları", Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi, vol. 4, no.3, pp.20-31, 2009.
- [66] J. Tang, "Unlocking Potentials of Microwaves for Food Safety and Quality", Journal of Food Science, vol.80, no.8, pp.1776-1793, 2015.
- [67] İ. Doymaz, A.S. Kıpçak ve S. Piskin, "Microwave Drying of Green Bean Slices: Drying Kinetics and Physical Quality", Czech J Food Sci, vol. 33, no.4, pp.367-376, 2015.
- [68] P.P. Lewicki, "Some Remarks on Rehydration of Dried Foods", Journal of Food Engineering, vol. 36, pp.81-87,1998.
- [69] M. Maskan, "Drying, Shrinkage and Rehydration Characteristics of Kiwi fruits During Hot Air and Microwave Drying", Journal of Food Engineering, vol.48, pp. 177-182, 2001.
- [70] E. Meisami-asl, S. Rafiee, A. Keyhani ve A. Tabatabaefar, "Determination of suitable thin layer drying curve model for apple slices (variety-Golab)", Plant Omics Journal, vol.3, no.3, pp.103-108, 2010.
- [71] T.Y. Akintude ve A. Ajala, "Air Drying Characteristics of Chili Pepper", International Journal of Food Engineering, vol. 6, no.1, Article 7,2010.
- [72] O.P. Sobukola, O.U. Dairo ve A.V. Odunewu, "Convective Hot Air Drying of Blanched Yam Slices", International Journal of Food Science and Technology, vol.43, pp.1233-1238, 2008.
- [73] N. Sanjuan, M. Lozano, P. Garcia-Pascal ve A. Mulet, "Dehydration Kinetics of Red Pepper", Journal of the Science of Food and Agriculture, vol. 83, pp.697-701, 2003.
- [74] İ. Türker, H. İşleroğlu, "Kuşburnu Pulpunun Kızılötesi Işınım ile İnce Tabaka Kurutulması", Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, vol.34, no.1, pp.118-128, 2016.
- [75] A.S. Kıpçak, "Microwave Drying Kinetics of Mussels (Mytilusedulis)", Reschem Intermediate, vol.43, no.3, pp.1429-1445, 2017.

- [76] M. Zarein, H. Amadi ve B. Ghobadian, ,“Investigation of Microwave Dryer Effect on Energy Efficiency During Drying of Apple Slices”, Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, vol. 14, no.1, pp.41-47, 2015.
- [77] İ. Türker, ve H. İşleroğlu, “Kuşburnu Pulpunun Kızılötesi Işınım ile İnce Tabaka Kurutulması”, Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University, vol. 34, no.1, pp.118-128, 2017.
- [78] H. Turan, Y. Kaya, D. Kocatepe, “Geleneksel Bir Gıdamız; Lakerda”, 2. Geleneksel Gıdalar Sempozyumu, 27-29 Mayıs, Van, 2009.
- [79] T. Afolabi, T. Y. Akintunde ve J.A. Adeyanju, “Mathematical Modeling of Drying Kinetics of Untreated and Pretreated Cocoyam Slices”, Journal Food Science Technologies, vol. 52, no.5, pp.2731-2740, 2015.
- [80] B. Adu ve L. Otten, “Microwave Heating and Mass Transfer Characteristics of White Beans”, Jagric Eng Res, vol. 64, no.1, pp.71-78, 1996.
- [81] A.M. Hasna, “Composite Dielectric Heating and Drying: The Computation Process”, Proceedings of the World Congress on Engineering, 1-3 Temmuz, 2009, London.
- [82] R. Renshaw ve B.C. Mimeche, New Insightsinto RF and Microwave Drying of Foods, University of Nottingham, PhDthesis, Nottingham, 2017.
- [83] R. Chavan ve C. Rupesh, “Microwave Baking in Food Industry: A Review“, Journal of Dairy Science, vol.5, no.3, pp.113-127,2010.
- [84] The Editors of Encyclopaedia Britannica,
<https://www.britannica.com/animal/sea-bass>, 3 Mayıs 2019.
- [85] https://en.wikipedia.org/wiki/Smoked_fish, 3 Mayıs 2019.
- [86] <http://balikblogu.blogspot.com/2011/10/ciroz.html>, 15 Nisan 2019.
- [87] <https://theculturetrip.com/north-america/greenland/articles/greenlandic-cuisine-exploring-the-flavours-of-the-arctic-circle/>, 15 Nisan 2019.
- [88] Odabaş, M.T.T., Püskürtmeli Kurutma,
<http://admin.ghu.edu.tr/media/uploads/gida/files/puskurtmeli-kurutma.pdf>, 21 Nisan 2019.
- [89] <http://aydinhabermerkezi.com/Ekonomi-kilic-holding-bir-ilki-gerceklestirdi-2040.html>, 20 Nisan 2019.
- [90] http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/70507/43547/faz_diyagramlar%C4%B1-2_2015-2016_yar%C4%B1y%C4%B1l%C4%B1.pdf, 15 Mayıs 2019.

Tezden Üretilmiş Yayınlar

İletişim Bilgisi: info@guvenplus.com.tr

Konferans Bildirileri

1. Levrek Balığının Mikrodalga Fırında Kuruma Karakteristiğinin İncelenmesi

