



**PALAMUT BALIĞINDA ULTRASON DESTEKLİ
KURUTMA KİNETİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

Fereshteh BABAEİ KALAM

Danışman: Prof. Dr. Ahmet AKKÖSE

Yüksek Lisans Tezi

Gıda Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**PALAMUT BALIĞINDA ULTRASON DESTEKLİ KURUTMA
KİNETİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

(Determination of Ultrasonic-Assisted Drying Kinetics in Atlantic Bonito)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fereshteh BABAEİ KALAM

Danışman: Prof. Dr. Ahmet AKKÖSE

Erzurum
Ağustos, 2025

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Fereshteh BABAEİ KALAM tarafından hazırlanan “**PALAMUT BALIĞINDA ULTRASON DESTEKLİ KURUTMA KİNETİKLERİNİN BELİRLENMESİ**” başlıklı çalışması .. / .. / 202. tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Gıda Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gıda Mühendisliği Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Unvan Ad SOYAD

Üniversite Adı

Aslı ıslak imzalıdır

Danışman: Unvan Ad SOYAD

Üniversite Adı

Aslı ıslak imzalıdır

Jüri Üyesi: Unvan Ad SOYAD

Üniversite Adı

Aslı ıslak imzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

.... / / 202..

Aslı ıslak imzalıdır

Prof. Dr. Alper NUHOĞLU

Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Prof. Dr. Ahmet AKKÖSE danışmanlığında sunulan “Palamut Balığında Ultrason Destekli Kurutma Kinetiklerinin Belirlenmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	3	30
Kuramsal Temeller	2	30
Materyal ve Yöntem	9	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	2	20
Sonuç ve Öneriler	5	20
Tezin Geneli	7	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Fereshteh BABAEİ KALAM	Prof. Dr. Ahmet AKKÖSE
23.7.2025	23.7.2025
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim boyunca her zaman desteğini hissettiğim, bana yol gösteren ve bu çalışmanın planlanmasından sonuçların değerlendirilmesine kadar her aşamada bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Ahmet AKKÖSE'ye içten teşekkür ederim.

Bu çalışmanın laboratuvar uygulamalarının gerçekleştirilmesinde büyük destek sağlayan Sayın Prof. Dr. Mükerrrem KAYA'ya ve Sayın Prof. Dr. Güzin KABAN'a içten şükranlarımı sunarım.

Araştırma sürecinde yapıcı görüş ve önerileriyle katkı sağlayan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mine KIRKYOL'a teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca sevgisi, sabrı ve fedakârlığıyla her zaman yanımda olan kıymetli annem Roghayeh MOLAEİ'ye, babam Soltanalı BABAEİ KALAM'a ve sevgili ablalarım ve abime teşekkür ederim.

Fereshteh BABAEİ KALAM

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PALAMUT BALIĞINDA ULTRASON DESTEKLİ KURUTMA KİNETİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Fereshteh BABAEİ KALAM

Danışman: Prof. Dr. Ahmet AKKÖSE

Amaç: Araştırmada, Atlantik palamudu (*Sarda sarda*) filetolarının farklı sıcaklıklarda (40°C, 50°C ve 60°C) kurutulmasında, ultrason işleminin kurutma kinetikleri ile etkin nem difüzyon katsayısı (D_{eff}) ve aktivasyon enerjisi (E_a) üzerindeki etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Kurutma kinetiklerinin ince tabaka kurutma modelleriyle uyumu belirlenmiştir.

Yöntem: Palamut balığı örneklerinden kesilen aynı boyutlardaki parçalar iki gruba ayrılarak gruplardan birine 35 kHz’de 20 dk süreyle ultrasonik su banyosunda ön işlem uygulanmış, diğer grup ise kontrol grubu olarak kullanılmıştır. Her iki gruptaki örnekler sıcak hava ile çalışan bir kurutma ünitesinde %30 bağıl nem ve 1 m/s hava hızında 72 saat kurutma işlemi uygulanmıştır. Kurutma işlemi boyunca belirlenen ağırlık kayıplarından yola çıkılarak örneklerdeki nem içerikleri belirlenmiş ve elde edilen veriler Newton, Page, Midilli, Henderson-Pabis, Logaritmik ve Two-Term Exponential modelleriyle doğrusal olmayan regresyona tabi tutulmuştur. Ayrıca Fick’in ikinci yasasından yola çıkılarak D_{eff} değeri ve Arrhenius ilişkisinden E_a değeri hesaplanmıştır.

Bulgular: Kontrol grubu örneklerde tüm sıcaklıklarda Midilli modeli kurutma verileriyle daha iyi uyum göstermiştir ($R^2 \geq 0,9973$). Ultrason uygulanmış örneklerde 40°C ve 60°C’de yapılan kurutma işlemlerinde Midilli modeli, 50°C’de ise Two-Term Exponential modeli daha iyi uyum sağlamıştır ($R^2 \geq 0,9990$; $RMSE \leq 0,0061$). Bununla birlikte ultrason işlemi, özellikle kurutmanın ilk 10 saatinde nemin uzaklaşma hızını artırarak kurutma etkinliğini artırmış, ayrıca kurutma sıcaklığının yükseltilmesi de kuruma etkinliğinde artışa yol açmıştır. Çalışmada D_{eff} değeri kontrol örneklerinde $4,85 \times 10^{-10} - 5,95 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, ultrason uygulanmış örneklerde ise $5,10 \times 10^{-10} - 6,41 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak tespit edilmiştir. Ultrason uygulamasının tüm sıcaklıklarda nem difüzyonunu %4–8 arasında artırdığı görülmüştür. Diğer yandan E_a değerleri kontrolde 6,46 ve 8,94 kJ/mol, ultrason uygulanmış grupta ise 8,08 ve 9,99 kJ/mol olarak bulunmuştur.

Sonuç: Ultrason uygulamasının Atlantik palamudunun sıcak hava ile kurutulmasında kütle transferini hızlandırarak nem difüzyonunu artırdığı, bununla birlikte aktivasyon enerjisinde de kısmen bir artışa yol açtığı belirlenmiştir. Palamut balığının kurutulmasında Midilli ve Two-Term Exponential modellerinin kurutma verileriyle daha iyi uyum sağladığı görülmüştür. Çalışma sonunda elde edilen bulguların balık kurutma endüstrisinde proses tasarımı, enerji verimliliği ve ürün kalitesi açısından önemli bilgiler sağladığı, ultrason ön işleminin özellikle nem difüzyonu artırarak kurutma etkinliğini artırabileceği görülmüştür. Bununla birlikte palamut balığının kurutulmasında ultrason uygulamasının etkinliğini optimize etmek amacıyla farklı işlem şartlarının kullanıldığı yeni çalışmalara da ihtiyaç vardır.

Anahtar Kelimeler: Atlantik palamudu, ultrason, kurutma kinetiği, D_{eff} , E_a , Midilli modeli

Ağustos 2025, 47 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

DETERMINATION OF ULTRASONIC-ASSISTED DRYING KINETICS IN ATLANTIC BONITO

Fereshteh BABAEI KALAM

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet AKKÖSE

Purpose: The study aimed to determine the effect of ultrasound treatment on the drying kinetics, effective moisture diffusivity (D_{eff}), and activation energy (E_a) during the drying of Atlantic bonito (*Sarda sarda*) fillets at different temperatures (40°C, 50°C, and 60°C). The conformity of the drying kinetics to thin-layer drying models was also determined.

Method: Equal-sized pieces cut from Atlantic bonito (*Sarda sarda*) fillets were divided into two groups; one group underwent a 20-min pretreatment in an ultrasonic water bath at 35 kHz, while the other served as the control. Both groups were dried for 72 h in a hot-air drying unit operating at 30 % relative humidity and an air velocity of 1 m s⁻¹. Moisture contents were calculated from the weight losses recorded during drying, and the resulting data were fitted by nonlinear regression to the Newton, Page, Midilli, Henderson–Pabis, Logarithmic, and Two-Term Exponential thin-layer models. The effective moisture diffusivity (D_{eff}) was estimated using Fick's second law, and the activation energy (E_a) was calculated from the Arrhenius relationship.

Findings: In the control group, the Midilli model exhibited the best fit to the drying data at all temperatures ($R^2 \geq 0.9973$). For the ultrasound-treated samples, the Midilli model provided the best fit at 40°C and 60°C, whereas the Two-Term Exponential model was superior at 50°C ($R^2 \geq 0.9990$; $\text{RMSE} \leq 0.0061$). Ultrasound pretreatment increased drying efficiency by accelerating moisture removal, particularly during the first 10 h, and higher drying temperatures further enhanced this effect. The D_{eff} values ranged from 4.85×10^{-10} to 5.95×10^{-10} m² s⁻¹ in the control samples and from 5.10×10^{-10} to 6.41×10^{-10} m² s⁻¹ in the ultrasound-treated samples, indicating a 4–8 % increase in moisture diffusivity across all temperatures with ultrasound. The corresponding E_a values were 6.46 and 8.94 kJ mol⁻¹ for the control group and 8.08 and 9.99 kJ mol⁻¹ for the ultrasound-treated group.

Conclusions: Ultrasound treatment was found to accelerate mass transfer during hot-air drying of Atlantic bonito by increasing moisture diffusivity, while also causing a partial rise in activation energy. The Midilli and Two-Term Exponential models showed superior agreement with the drying data for bonito. The findings provide valuable insights for process design, energy efficiency, and product quality in the fish-drying industry, indicating that ultrasound pretreatment can enhance drying efficiency primarily by promoting moisture diffusion. However, further studies employing different processing conditions are needed to optimise the effectiveness of ultrasound in the drying of bonito.

Keywords: Atlantic bonito, Ultrasound, Drying kinetics, D_{eff} , E_a , Midilli model

August 2025, 47 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TABLolar DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	ix
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	8
MATERYAL VE METOT.....	12
Materyal	12
Metot	12
Örneklerin hazırlanması	12
Ultrason işlemi	12
Kurutma işlemi.....	13
Nem tayini	14
Yağ tayini	14
Ham protein tayini.....	14
Kurutma kinetikleri	15
Nem difüzyon katsayısının belirlenmesi	17
Aktivasyon enerjisi.....	18
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	19
Nem Oranları.....	19
Kurutma Kinetikleri ve Modellerin Uyum Analizi	20
Nem Difüzyon Katsayısı	26
Aktivasyon enerjisi.....	29
SONUÇ ve ÖNERİLER	30
KAYNAKÇA	32
ÖZGEÇMİŞ.....	36

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Kurutma Özelliklerinin İncelenmesinde Kullanılan Matematiksel Modeller	16
Tablo 2. Kontrol Grubu Palamut Örneklerine Ait Model Uyum Sonuçları	21
Tablo 3. Ultrason Ön İşlemi Uygulanmış Palamut Örneklerine Ait Model Uyum Sonuçları.	23
Tablo 4. Farklı Sıcaklıklarda Belirlenen Etkin Nem Difüzyon Katsayısı (D_{eff}) Değerleri.....	27



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Palamut balığı filetolarından hazırlanan örnekler	12
Şekil 2. Örneklere uygulanan ultrason işlemi	13
Şekil 3. Kurutma işlemi sonunda elde edilen numunelerin görünümü	14
Şekil 4. Farklı sıcaklıklarda kontrol örneklerinde zamana bağlı olarak belirlenen nem oranı değişim eğrisi	19
Şekil 5. Farklı sıcaklıklarda ultrason ön işlemlili örneklerde zamana bağlı olarak belirlenen nem oranı değişim eğrisi	20
Şekil 6. Kontrol gurubu örneklerinde 40 °C de Midilli modeli uyum grafiği.....	24
Şekil 7. Kontrol gurubu örneklerinde 50 °C de Midilli modeli uyum grafiği.....	24
Şekil 8. Kontrol gurubu örneklerinde 60 °C de Midilli modeli uyum grafiği.....	25
Şekil 9. Ultrason işlemi uygulanmış örneklerin 40 °C’de Midilli modeli uyum grafiği.....	25
Şekil 10. Ultrason işlemi uygulanmış örneklerin 50 °C’de Two-Term Exponential modeli uyum grafiği	26
Şekil 11. Ultrason işlemi uygulanmış örneklerin 60 °C’de Midilli modeli uyum grafiği.....	26
Şekil 12. Sıcaklığa bağlı olarak nem D_{eff} değerlerinde meydana gelen değişim	28

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

a, b, c, g	Model katsayıları
AOAC	Association of Official Analytical Chemists
D_{eff}	Etkin nem difüzyon katsayısı
dk	Dakika
E_a	Aktivasyon enerjisi
exp	Üstel fonksiyon
k, k₁, k₂	Kurutma hızı sabiti
K₁	Arrhenius denkleminde eğim
L	Numune kalınlığı
Ln	Doğal logaritma
Me	Denge nem içeriği
M_i	Başlangıç nem içeriği
MR	Nem oranı
MR	Nem oranı
M_t	Belirli andaki nem içeriği
N	Gözlem sayısı
N	Serbestlik derecesi / model parametresi
R	Evrensel gaz sabiti
R²	Belirleme katsayısı
RMSE	Kök ortalama kare hata
SSE	Toplam hata kareleri toplamı
T	Mutlak sıcaklık
T	Zaman
US	Ultrason
USV	Ultrasonik vakum
UV	Ultraviyole
χ²	Ki-kare değeri

GİRİŞ

Gıdalar, mikroorganizmaların faaliyetleri, enzimatik reaksiyonlar ve çevresel etkenler gibi nedenlerle bozulma eğilimi göstermektedirler. Gıdaların bozulması, renk, koku ve lezzet gibi özelliklerde istenmeyen değişikliklerin oluşması ve insan tüketimine uygunluğunu yitirmesi şeklinde tanımlanabilir. Gıdaların bozulmasını önlemek ve raf ömrünü uzatmak amacıyla tarih boyunca çeşitli muhafaza yöntemleri geliştirilmiştir. Bu bağlamda kurutma, soğutma ve fermantasyon gibi teknikler ilkel dönemlerden beri uygulanmakta olan en eski yöntemlerden bazılarıdır. Diğer yandan modern yöntemler olarak ise konserveleme, pastörizasyon, dondurma, ışınlama ve kimyasal koruyucuların kullanımı gibi yöntemler yaygınlaşmıştır. Ayrıca ambalajlama teknolojilerindeki gelişmeler de gıdaların modern yöntemlerle uzun süre muhafaza edilebilmesine katkı sağlamaktadır (Desrosier 2025).

Gıdaların kurutulması, tarih boyunca kullanılan en eski ve yaygın yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Kurutma işlemi temelde bir gıdanın içindeki nemin uzaklaştırılmasıyla gerçekleştirilen kompleks bir işlemdir. Bu işlemde ısı ve kütle transferiyle birlikte ürünün fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinde değişimler meydana gelmektedir (Zarein *et al.* 2015). Kurutmada gıdanın su içeriği azaltılarak bozulması önlenmektedir. Kurutma işleminde, gıdada bulunan suyun uzaklaştırılması, iç katmanlardan yüzey katmanına doğru suyun hareket etmesi ve yüzeyden suyun buharlaşması şeklinde gerçekleşmektedir. Suyun gıdanın yüzeyinden buhar olarak uzaklaştırılması sırasında, kurutma sıcaklığı, hava nemi, hava hızı, maruz kalan yüzey özellikleri ve basınç gibi önemli faktörler söz konusudur. Diğer yandan kurutma işlemi sırasında uygulanan ısı, kondüksiyon, konveksiyon, radyasyon veya bunların kombinasyonu halinde ürüne aktarılabilir (Mujumdar 2006).

Geçmişte güneşte kurutma yöntemi yaygınken, günümüzde gelişmiş ekipmanlar ve çeşitli kurutma yöntemleri kullanılmaktadır (Zarein *et al.* 2015). Kurutma yöntemleri doğal kurutma ve yapay (endüstriyel) kurutma olarak iki ana gruba ayrılabilir. Doğal kurutma işlemi, güneş enerjisi ve çevre şartları kullanılarak yapılan yöntemleri içermektedir. Bu yöntem en eski kurutma şekillerinden biri olup özellikle geleneksel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu doğal kurutma yöntemleri hava durumuna bağlı olduğu için sürekliliği ve kontrolü zorluklar içermekte, ayrıca böcekler, kuşlar, toz gibi dış etkenlere maruz kalarak ürün kayıpları yaşanabilmektedir. Yapay kurutmada ise ısıtıcılar, fanlar, vakum pompaları, mikrodalga jeneratörleri gibi ekipmanlar kullanılarak sıcaklık, hava akışı, süre gibi

parametreler daha iyi kontrol edilebilmekte, böylece kontrollü bir ortamda kurutma işlemi sağlanmaktadır. Bu nedenle günümüzde endüstriyel ölçekte kurutma işlemlerinin büyük çoğunluğu yapay kurutma yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir (Adeyeye 2019).

Yapay kurutma yöntemleri arasında en yaygın olarak kullanılanı sıcak hava ile yapılan kurutma işlemidir (konvansiyonel kurutma). Bu yöntemde ısıtılmış hava kontrollü şartlar altında gıdanın etrafından geçirilerek suyun buharlaştırılması sağlanmaktadır. Konvansiyonel kurutma nispeten basit ekipman ve düşük yatırım maliyeti ile uygulanabilmesine karşın, uzun kurutma süresi, yüksek enerji tüketimi, düşük enerji verimliliği ve özellikle gıda yüzeyinde kabuklaşma gibi bazı sorunlar oluşturabilmektedir (Cao *et al.* 2021). Bunun yanı sıra son yıllarda kurutma teknolojisinde önemli ilerlemeler kaydedilmiş olup mikrodalga destekli kurutma, dielektrik ısıtma, vakumlu kurutma, dondurarak kurutma, infrared (kızılötesi) kurutma gibi modern kurutma teknikleri geliştirilmiştir. Bu modern teknikler, konvansiyonel yöntemlere kıyasla daha yüksek kurutma hızı ile daha kısa işlem süresi, daha düşük enerji tüketimi ve daha iyi ürün kalitesi gibi avantajlar sunabilmektedir. Örneğin; mikrodalga ile kurutma, gıdanın iç kısımlarını hızlı şekilde ısıtarak suyun buharlaşmasını hızlandırmakta ve toplam kurutma süresini kısaltmaktadır. Vakum altında kurutma işleminin ise, daha düşük sıcaklıklarda suyun uzaklaştırılmasını sağlayarak ısıl zararı azalttığı bilinmektedir. Dondurarak kurutma (liyofilizasyon) ise besin öğelerini ve duyuşal özellikleri en iyi koruyan yöntemlerden biri olup, düşük sıcaklık ile vakum altında suyun buz halinden doğrudan buhar haline geçmesi prensibine dayanmaktadır. Tüm bu modern yöntemlerin kendine özgü avantajları bulunmakla birlikte, genellikle yatırım ve işletme maliyetleri daha yüksektir. Bu nedenle, kurutma işleminin seçimi ürüne, hedeflenen kaliteye ve ekonomik koşullara bağılı olarak yapılmalıdır (Adeyeye 2019).

Kurutma işlemi sırasında, ürün nem kaybederken ilk olarak, ürün yüzeyindeki serbest suyun buharlaştığı ve kuruma hızının sabit kaldığı “sabit hızda kuruma evresi” gözlemlenmektedir. Bu evrede, yüzeydeki suyun buharlaşma hızı, ürün içindeki suyun yüzeye taşınma hızına eşit olduğundan kuruma hızı sabit seyretmektedir. Daha sonra, ürün içindeki suyun yüzeye difüzyonuyla sınırlanan ve kuruma hızının azaldığı "azalan hızda kuruma evresi" başlamaktadır. Bu evrede, iç kısımlardaki suyun yüzeye ulaşma hızı, yüzeyden buharlaşma hızından daha düşük olup kuruma hızı giderek azalmaktadır. Bu bağlamda, endüstriyel kurutma proseslerinin tasarımı ve ölçeklendirilmesi ile nihai ürün kalitesinin kontrolü için bunların bilinmesi kritik öneme sahiptir. Ayrıca kurutma kinetiğinin anlaşılması, belirli koşullar altında bir gıdanın ne kadar sürede kuruyacağını, nem içeriğinin zamana bağılı olarak nasıl değişeceğini ve kurutma hızının nasıl seyrettiğini öngörmek açısından da önemlidir (Álvarez *et al.* 2021).

Kurutma kinetiğinin anlaşılmasında matematiksel modellemelerin hem teorik bilgi sağlaması hem de pratik uygulanabilirliği açısından kritik bir öneme sahip olduğu kabul edilmektedir. Bu modeller, deneysel kurutma verilerinin (zaman-nem içeriği ilişkisi) uygun matematiksel denklemlerle temsil edilmesini sağlamakta ve böylece kuruma sürecinin dinamikleri nicel olarak analiz edilebilmektedir. Bu bağlamda ince tabaka kurutma modelleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde yer alan ince tabaka kurutma modelleri genel olarak teorik (analitik), yarı-teorik (yarı-ampirik) ve ampirik (deneysel) modeller olmak üzere üç grupta sınıflandırılmaktadır. Teorik modeller, nem transferini Fick'in ikinci difüzyon yasası çerçevesinde değerlendirmekte ve nemin madde içersindeki hareketini fiziksel prensiplerle anlamayı hedeflemektedir (Kucuk 2014). Teorik modellerin uygulanabilirliği, genellikle malzemenin fiziksel özellikleri hakkında kapsamlı bilgi gerektirmesi nedeniyle sınırlıdır. Diğer yandan yarı-teorik modeller, hem pratikteki uygulanabilirlikleri hem de belirli fiziksel temellere dayanmaları nedeniyle öne çıkmaktadır. Bu bağlamda özellikle gıda ürünlerinin kurutulmasında yaygın olarak tercih edilmektedir (Onyenwigwe *et al.* 2023). Ampirik modeller ise nem içeriği ile zaman arasındaki ilişkiyi doğrudan elde ettiği deneysel verilerden açıklamaktadır. Ancak bu süreçte altta yatan fiziksel mekanizmaların göz ardı edildiği bildirilmektedir (Inyang *et al.* 2018). Bu modeller arasında yarı-teorik modeller kuruma eğrisini yeterli doğrulukla temsil edebilme kapasiteleri nedeniyle endüstriyel kurutma süreçlerinde yaygınlık kazanmaktadır. Bununla birlikte yarı-teorik modeller, gerçekleştirildiği belirli sıcaklık, bağıl nem ve hava hızı aralıklarında geçerlilik sağlamak ve pratikteki uygulanabilirlikleri nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir (Aregbesola *et al.* 2022).

Kurutma işlemi, doğası gereği yüksek enerji gerektiren bir proses olup bu enerji ihtiyacı doğrudan kurutma süresiyle ilişkilendirilmektedir. Bu nedenle, uygun model seçimi ekonomik verimlilik bakımından da belirleyici bir rol oynamaktadır. Newton (Lewis), Page, Henderson–Pabis, Logaritmik ve Two-Term gibi çeşitli ince tabaka modelleri, farklı kurutma teknikleri ve ürün tipleri için bazı çalışmalarda başarılı bir şekilde uygulanmıştır (Murali *et al.* 2021; Başlar vd 2015). Araştırmalar kapsamında özellikle bu modellerin sağladığı öngörüler sayesinde, kurutulan üründe nihai nem içeriğine ulaşmak için gereken süre ve koşulların önceden tahmin edilebildiği, bu durumun da kurutma sistemlerinin tasarımı, proses optimizasyonu ve enerji verimliliği açısından önemli avantajlar sunduğu bildirilmektedir (Fikry *et al.* 2023).

Kurutma sürecinde kritik bir parametre olan etkin nem difüzyon katsayısı (D_{eff}), gıda içersindeki nemin difüzyon hızını yansıtan fiziksel bir büyüklük olarak tanımlanabilmektedir. D_{eff} genellikle Fick'in ikinci yasasının türevleri kullanılarak deneysel verilerden hesaplanmaktadır. Azalan hızda kuruma evresinin, iç difüzyonla kontrol edildiği varsayımı

altında, D_{eff} değeri deneysel nem-zaman verisine uygun bir difüzyon modelinin çözümüyle elde edilebilmektedir. Yüksek D_{eff} değeri, su moleküllerinin ürün içinde daha hızlı hareket ettiğini ve yüzeye ulaşarak buharlaştığını göstermektedir. Bu durum ise, kurutma süresinin kısılmasına katkıda bulunmaktadır. Kurutma koşullarına bağlı olarak hesaplanan D_{eff} değeri farklılık göstermekte olup, farklı çalışmalar ile elde edilen değerlerin karşılaştırılması hangi koşullarda iç difüzyonun daha kolay gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Örneğin, daha yüksek sıcaklıklarda kurutma işlemi genellikle ürün yapısındaki suyun enerjisini artırarak difüzyon hızını yükseltmekte, D_{eff} değerlerinde de artış olduğu bildirilmektedir (Barforoosh *et al.* 2024). Diğer yandan Arrhenius eşitliği kullanılarak D_{eff} 'nin sıcaklık bağımlılığı tanımlanabilmekte ve aktivasyon enerjisi (E_a) hesaplanabilmektedir. Etkin difüzyon için hesaplanan E_a , suyun ürün içinde hareket etmesi için gereken enerji bariyerini temsil etmektedir. Bu bahsedilen parametrelerin bilinmesiyle, kurutma sürecinin tasarımı daha bilimsel bir temele oturtularak optimal koşulların belirlenmesi mümkün olmaktadır (Adekanye *et al.* 2025).

Ultrason işlemi, hızlı gelişen teknolojilerden biri olan, kavitasyon, ısınma etkisi ve sünger etkisi nedeniyle gıda işleme alanında sıklıkla kullanılmaktadır (Chemat and Khan 2011). Ultrason, 20 kHz ile 1 MHz frekans aralığında gerçekleşen döngüsel bir ses dalgasıdır (Rastogi 2011). Yüksek ultrasonik frekanslar daha düşük güçle teşhis-görüntüleme işlemi için kullanılırken, daha düşük frekanslar daha yüksek güçle ultrason destekli konvektif kurutma gibi işlemlerde kullanılabilmektedir (Gallego-Juárez *et al.* 2007). Ultrason işleminin, kurutma hızını artırarak kurutma süresini azaltabildiği bildirilmektedir (Yao 2016). Ayrıca ultrason destekli kurutma işlemiyle daha düşük sıcaklıklarda gıdaların kurutulabileceği ifade edilmektedir (Cárcel *et al.* 2011). Akustik kurutma olarak da bilinen ultrason destekli kurutma, kavitasyon nedeniyle oluşan ses dalgalarının gıda matrisinde yarattığı sıkıştırma ve genleşme etkilerine dayanmaktadır. Bu etkilerin gıdaların yapısında mikrokanal oluşumunu teşvik ederek kapillerlerdeki nemin daha kolay dışarı atılmasını sağladığı bildirilmektedir (De la Fuente-Blanco *et al.* 2006).

Ultrasonun kurutma teknolojilerinde kullanımı çeşitli şekillerde uygulanabilmektedir. Bu kapsamda kullanılan yaygın bir yaklaşım, kurutma öncesinde ürüne belli bir süre ultrasonik ön işlem uygulamaktır. Kurutulacak ürünün su veya hipertonic bir çözelti içerisinde ultrasonik banyo ile muamele edilmesinin ardından sıcak havada kurutulmasının kurutma hızını artırabildiği bildirilmektedir (Fikry *et al.* 2023). Bir diğeri ise ultrason destekli sıcak hava kurutucuları veya ultrasonik vakum kurutma sistemleri kullanılarak yapılan ve kurutma sırasında ultrason enerjisinin doğrudan veya dolaylı olarak ürüne verilmesine dayanan yaklaşımlardır (Başlar 2015). Her iki yaklaşımda da, ultrasonun sağladığı kütle ve ısı transferi

iyileştirici etkilerden faydalanılarak geleneksel kurutma yöntemlerinin verimini yükseltmek hedeflenmektedir. Literatürde son yıllarda ultrason destekli kurutma konusunda birçok çalışma bulunmaktadır. Özellikle konvektif (sıcak havalı) kurutma ile eşzamanlı ultrason uygulamasının, kurutma hızını artırdığı ve kurutma süresini belirgin ölçüde azalttığı bildirilmiştir (Fikry *et al.* 2023; Ozyalcin and Kipcak 2021).

Su ürünleri, tuzlu veya tatlı su ekosistemlerinden elde edilen balıklar, kabuklular, yumuşakçalar ve su bitkileri gibi çeşitli organizmaları kapsayan, yüksek besin değerine sahip çok bileşenli bir gıda grubudur (Golden *et al.* 2021). Günümüzde nüfus artışının hızlı olması ve yüksek kaliteli protein alımının yetersizliği su ürünlerine olan ilgiyi artırmış ve bu kaynakların etkin bir şekilde kullanılması gerekliliği fark edilmiştir. Balık eti, en fazla tüketilen su ürünlerinden biri olup yüksek kaliteli bir protein kaynağıdır. Bunun yanı sıra Omega-3 yağ asitleri ile D ve B2 (riboflavin) gibi vitaminler açısından da zengin bir gıdadır. Ayrıca kalsiyum ve fosfor bakımından da zengin olup demir, çinko, iyot, magnezyum ve potasyum gibi mineraller için mükemmel bir kaynaktır. Bu yönleriyle insan beslenmesi açısından kıymetli olup aynı zamanda içerdiği uzun zincirli doymamış yağ asitleriyle de kalp-damar hastalıklarının önlenmesi gibi sağlık yönünden çeşitli avantajları da bildirilmektedir (Anonymous 2023). Bu nedenlerle balık etinin, dünya genelinde birçok bölgede önde gelen bir hayvansal protein kaynağı haline gelmeye başladığı rapor edilmiştir (Bozaris 2014).

Su ürünleri değerli bir gıda olmasına karşın hızlı bir şekilde bozulma eğilimi göstermekte olup yıl boyunca tüketimi, mevsim değişikliklerden kaynaklanan üretimdeki dalgalanmalardan dolayı zorlaşmaktadır. Bu durum değerli besin maddelerce zengin olan bu gıdanın yetersiz tüketimine yol açmaktadır (Chen *et al.* 2014). Bahsedilen bu nedenlerle, bazı teknolojik prosesler kullanılarak su ürünlerinin muhafazası sağlanabilmektedir (Pradhan *et al.* 2018). Günümüzde su ürünlerinin muhafazasında dondurma, soğutma ve konserveleme gibi yaygın yöntemler kullanılmaktadır. Diğer yandan geleneksel olarak eski çağlardan beri kullanılan ve hala dünyanın birçok bölgesinde uygulanan yöntemler ise tuzlama, kurutma, dumanlama ve fermente etme olarak sayılabilmektedir. Ancak bu yöntemler genellikle kombinasyon halinde kullanılmaktadır. Örneğin, tuzlama işlemi kurutma ile birlikte gerçekleştirilmekte ve sonunda dayanıklı ve lezzetli bir ürüne ulaşılabilmektedir (Gallart-Jornet *et al.* 2007).

Su ürünlerinde kurutma işlemi, raf ömrünü uzatmak, mikrobiyal bozulmayı önlemek ve taşımayı kolaylaştırmak amacıyla yüzyıllardır kullanılan temel muhafaza yöntemlerinden biridir. Geleneksel olarak açık havada güneş altında yapılan kurutma yöntemleri, düşük maliyetli olmakla birlikte hava koşullarına bağlılık, mikrobiyal kontaminasyon ve kalite

kayıpları gibi dezavantajlar taşımaktadır (Fitri *et al.* 2022). Bu nedenle günümüzde balık, karides ve kalamar gibi su ürünlerinde sıcak havayla kurutma, vakum kurutma, mikrodalga destekli kurutma, ultrason destekli kurutma, infrared kurutma ve dondurarak kurutma gibi modern teknikler yaygınlaşmaktadır (Murali *et al.* 2021; Başlar vd 2015). Özellikle ultrason destekli kurutma yöntemi, ürün iç yapısında porozite oluşturarak suyun daha hızlı difüze olmasını sağlayarak kurutma süresini kısaltırken enerji verimliliğini de artırmaktadır (Fikry *et al.* 2023; Fikry *et al.* 2024). Diğer yandan bu yeni nesil teknolojiler, yalnızca süre ve enerji tasarrufu sağlamakla kalmayıp aynı zamanda ürünün renk, doku ve besin değerlerini daha iyi koruyarak daha kaliteli nihai ürün elde edilmesine olanak tanımaktadır. Bu gelişmeler, geleneksel su ürünü işleme yöntemlerinin ötesine geçilerek endüstriyel ölçekte sürdürülebilir ve güvenli kurutma süreçlerinin tasarlanmasını mümkün kılmaktadır (Murali *et al.* 2021).

Bangladeş, Güney Kore ve Japonya gibi Asya ülkelerinden, genellikle kurutma işlemi asya kedibalığı (*Pangasius hypophthalmus*) (Kumar *et al.* 2017), tuna (*Katsuwonus pelamis*) (Takenaka *et al.* 2020), Alaska morinası (*Gadus chalcogrammus*) (Choi *et al.* 2016) ve Pasifik sardalyası (*Cololabis saira*) (Puligundla *et al.* 2018) gibi balıklarda yapılmaktadır. Avrupa ülkelerinde ise Norveç'e ait kurutulmuş balık ürünlerinden Stockfish ve Clipfish örnek gösterilebilmektedir. Stockfish, özellikle Kuzeydoğu'ya göç eden Kuzey Denizi morinasının (*Gadus morhua*) tuzlanmadan havada kurutulmasıyla elde edilen bir üründür. Ürün Norveç'e ait olmasına rağmen, büyük ihracat nedeniyle tüketimi dünya çapında yaygınlık göstermektedir. Norveç aynı zamanda tuzlanmış kurutulmuş balık olan clipfish'i de büyük miktarlarda üretmektedir. Stockfish'e benzer şekilde, clipfish de Norveç morinası kullanılarak yapılmaktadır (Bantle and Hanssler 2013). Benzer şekilde, Türkiye ve Yunanistan'da lakerda adı verilen geleneksel ürün, torik/palamut gibi balıkların tuzlanarak olgunlaştırılmasıyla hazırlanır ve bu da balığın bozulmadan uzun süre muhafaza edilerek tüketimini sağlamaktadır (Erkan vd 2020).

Atlantik palamutu (*Sarda sarda* Bloch, 1793), *Scombridae* familyası üyelerinden biri olan, çoğunlukla Atlantik Okyanusu'nun tropikal ve ılıman sahil bölgeleri, Meksika Körfezi ve Akdeniz ile Karadenizde bulunan bir balık türüdür. Palamut balığının avlanması genellikle Eylül ayında başlamakta ve Ocak ayına kadar devam etmektedir. En yüksek avlanma oranının Eylül ve Kasım aylarında gerçekleştiği rapor edilmiştir (Kınacıgil 2017). Türkiye'de özellikle Karadeniz ve Marmara Denizi'nde mevsimsel göçlerle bol miktarda avlanan Atlantik palamutu, ekonomik değeri yüksek su ürünlerinden biridir. Nitekim Atlantik palamutu, Türkiye'nin Karadeniz kıyılarında en önemli balıkçılık türlerinden biri olarak kabul edilmekte ve her yıl bu türün önemli bir miktarı avlanmaktadır (Genç vd. 2025). Palamut balığı taze olarak

tüketilebildiği gibi tuzlanarak lakerda adı verilen bir ürüne de dönüştürülmekte (Erkan vd 2020), bunun yanı sıra palamut konservesi, füme palamut gibi işlenmiş ürünler yapılabilmektedir (Koral *et al.* 2010). Ayrıca Japonya’da palamut balığı eti tütsülendikten sonra kurutularak Katsaboushi adı verilen bir ürüne de dönüştürülmektedir (Kato and Kikugawa 1999). Bununla birlikte literatürde palamut balığında kurutma işleminin dikkate alındığı ve kurutma kinetiklerinin belirlendiği bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu tez çalışmasında, palamut balığında kurutma işlemi dikkate alınmış ve ultrason uygulanmasının kurutma kinetiklerine etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla Atlantik palamutu balığından çıkarılan fileto parçalarına ultrason uygulanarak hem ultrason uygulanan örnekler hem de ultrason uygulanmayan kontrol örnekleri üç farklı sıcaklıkta (40°C, 50°C ve 60°C) kurutma işlemine tabii tutulmuştur. Kurutma süresince belirli aralıklarla numunelerin ağırlıkları ölçülerek nem içerikleri zaman fonksiyonu olarak kaydedilmiş ve böylece kurutma kinetiği verileri elde edilmiştir. Elde edilen deneysel veriler, önceki bölümlerde bahsedilen Newton, Page, Henderson-Pabis gibi çeşitli ince tabaka kurutma modellerine uygulanmış ve her bir modelin deneysel veriye uyum başarısı istatistiksel kriterlerle (R^2 , chi-kare, RMSE vb.) değerlendirilmiştir. Bu sayede, Atlantik palamutu için kurutma davranışını en iyi temsil eden matematiksel model belirlenmiştir. Ayrıca her bir kurutma koşulu için etkin nem difüzyon katsayıları (D_{eff}), Fick difüzyon modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Farklı sıcaklıklarda hesaplanan D_{eff} değerlerinden Arrhenius denklemi yardımıyla aktivasyon enerjisi (E_a) saptanarak, sıcaklığın nem difüzyonu üzerindeki etkisi de nicel olarak ortaya konmuştur.

KURAMSAL TEMELLER

Su ürünlerinin kurutulmasında geleneksel ve yenilikçi yöntemlerin incelendiği bir çalışmada kurutma ön işlemleri, farklı kurutma teknolojileri ve gerçek zamanlı izleme tekniklerinin ürün kalitesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Sıcak hava ile kurutma, dondurarak kurutma ve kızılötesi kurutma gibi yöntemlerin yanı sıra ısı pompalı kurutma, mikrodalga, vakum, radyo frekans ve kombine kurutma yöntemleri ele alınmıştır. Geleneksel yöntemlerde kurutma süresinin uzun ve kalite kontrolünün zor olduğu, yeni teknolojilerin ise daha kısa sürede yüksek kaliteli kurutma sağladığı ancak yüksek maliyet ve ölçeklenebilirlik sorunu olduğu vurgulanmıştır. Sonuç olarak, su ürünlerinde kombine kurutma tekniklerinin verimliliği artırıp kaliteyi iyileştirdiği, gelecekte düşük maliyetli ve endüstriyel ölçekte uygulanabilir yeni kurutma proseslerine ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir (Wu *et al.* 2024).

Murali *et al.* (2021) karidesin kurutulmasında güneş enerjili ve LPG destekli hibrit bir sistemin performansını araştırdıkları çalışmalarında, farklı sıcaklıklarda kurutulan karideslerin nem kaybı hızlarını ve kalite parametrelerini ölçmüşlerdir. Elde edilen sonuçlar çeşitli ince tabaka modelleriyle karşılaştırılmıştır. Hibrit sistem, geleneksel yöntemlere kıyasla %30'a varan daha kısa sürede kurutma sağlayarak enerji verimliliğini artırmıştır. Kurutma eğrileri Page modeli ile yüksek uyum göstermiş ve bu sistemin hem ekonomik hem de sürdürülebilir olduğu, kurutma proseslerine entegre edilebileceği önerilmiştir.

Fitri *et al.* (2022) balıkların çeşitli kurutma yöntemleriyle işlenmesi sırasında gerçekleşen kimyasal ve besinsel değişimlerin sistematik bir şekilde belirlenmesini amaçlamışlardır. Bu bağlamda farklı sıcaklıklarda ve koşullarda yapılan kurutmalarda su aktivitesi düşüşü, pH değişimleri, renk kayıpları ve yağ oksidasyonu gibi parametreler incelenmiştir. Çalışmada özellikle tuzlama gibi ön işlemlerin nem kaybını hızlandırarak mikrobiyolojik kalitenin iyileşmesine katkı sağladığı saptanmıştır. Ayrıca farklı tekniklerin karşılaştırılması neticesinde, uygun sıcaklık ve yeterli zamanla kurutulan ürünlerde besin değerlerinin daha iyi korunduğu ve daha uzun raf ömrü sağlandığı belirtilmiştir. Böylece çalışma, su ürünlerinin kurutulmasında kalite kontrolü için parametrelerin optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Adeyeye (2019) tarafından yapılan bir çalışmada ise balıkların kurutulmasındaki nem kaybı davranışları ve bu sürecin matematiksel modellemeyle tahmini incelemiştir. Araştırmada kurutma sırasında sabit hız döneminin genellikle gözlenmediği, sürecin çoğunlukla iç

difüzyonla sınırlı azalan hızda kurutuma döneminde gerçekleştiği vurgulanmıştır. Page, Henderson-Pabis, Logarithmic gibi çeşitli ince tabaka modellerinin değerlendirmesi yapılmış ve Page modelinin çoğu balık türünde en iyi uyumu sağlayan model olduğu belirtilmiştir.

Somon ve alabalık filetolarında ultrason destekli vakum kurutmanın kurutma kinetikleri ve nem difüzyon katsayısına etkisinin değerlendirildiği bir çalışmada farklı sıcaklıklarda (55°C, 65°C, ve 75°C) kurutma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ultrason uygulanmasının ürünlerin kuruma süresini belirgin şekilde azalttığı ve difüzyon katsayılarının önemli düzeyde yükseldiği bildirilmiştir. Ayrıca Page modeliyle yüksek korelasyon elde edilmiş ve ultrasonun kütle transfer mekanizmasını olumlu etkileyerek ürün dokusunda gözenekli yapı oluşturduğu görülmüştür. Araştırma, ultrason teknolojisinin kurutma süresini %27'ye kadar kısaltarak verimliliği artırabileceğini ortaya koymaktadır (Başlar vd. 2015).

Akpan *et al.* (2024) yaptıkları bir çalışmada tuzlu suyla ön işlemden geçirilen tatlı su karides filetolarının farklı sıcaklıklarda kurutulmasını incelemişlerdir. Araştırmada kuruma süreci boyunca kinetik davranışlar, nem difüzyon katsayıları ve aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır. Tuz konsantrasyonunun artmasıyla difüzyon katsayısının yükseldiği, ancak belli bir noktadan sonra etkinin sabitlendiği belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada artan tuz konsantrasyonunun kurutma süresini düşürdüğü ve enerji tüketimini de azalttığı bildirilmiştir. Böylece tuzlu su ön işleminin kurutma sürecinde iç nem taşınımını hızlandırarak verimliliği artırabileceği tespit edilmiştir.

Tilapia balığının kurutulması üzerine yapılan bir çalışmada, farklı sıcaklıklarda uygulanan kurutma işlemi boyunca nem difüzyon katsayıları ve aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır. Elde edilen veriler, sıcaklığın artmasıyla nem difüzyon hızının arttığını ve Page modelinin kuruma verilerini başarıyla temsil ettiğini göstermiştir. Böylece su ürünlerinde kurutma süresi öngörülebilir hale gelmekte ve enerji verimliliği de sağlanmaktadır. Ayrıca çalışma, kurutma süreçlerinin matematiksel olarak modellenmesiyle operasyonel planlamanın kolaylaşabileceğini de ortaya koymaktadır (Komolafe *et al.* 2018).

Nie *et al.* (2025) ise tilapia filetolarının yarı kurutulmuş ürün haline getirilmesinde ultrason destekli salamura ve UV yardımcı kurutmanın aroma profili ve nem kaybına etkisini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında ultrason uygulamasının ürün dokusunda gözenekli yapı oluşturarak nemin uzaklaştırılmasını kolaylaştırdığı, UV işleminin ise uçucu aroma bileşenlerinin zenginliğini artırdığı bulunmuştur.

Cao *et al.* (2021) yaptıkları çalışmada tuzlanmış morina balığında düşük sıcaklıkta ultrason destekli hava ile kurutmanın etkilerini araştırmışlardır. Ultrason uygulamasının, balık dokusunda gözeneklilik oluşturarak iç nemin yüzeye taşınmasını hızlandırdığı ve kuruma

süresini %35'e kadar azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca ultrason işlemi difüzyon katsayılarını arttırmış, ürünün rehidrasyon kapasitesini de iyileştirmiştir. Böylelikle, araştırma düşük sıcaklık koşullarında bile ultrasonun kurutma etkinliğini artırdığını ve kaliteyi koruyarak enerji tasarrufu sağladığını göstermektedir.

Asya levreği üzerine yapılan bir çalışmada balık derisinin sıcak hava ile kurutulmasında ultrason ön işleminin etkileri incelenmiş ve ultrason uygulanan örneklerde kuruma süresinin yaklaşık %28 oranında azaldığı, nem difüzyon katsayısının yükseldiği ve enerji tüketiminde %22 oranında azalma sağlandığı tespit edilmiştir. Ayrıca kuruma davranışının Modified Page modeliyle başarılı bir şekilde temsil edildiği bildirilmiştir. Mikroyapı analizlerinde ise ultrasonun hücre yapısında gözenek oluşturduğu ve bu durumun nem taşınımını hızlandırdığı saptanmıştır. Tüm bu veriler, ultrason uygulamasının balık yan ürünlerinde verimliliği artıran etkili bir ön işlem olduğunu ortaya koymuştur (Fikry *et al.* 2023). Diğer yandan aynı üründe yapılan bir diğer çalışmada da balık derisinin hava ile kızartma (air-frying) yöntemiyle kurutulması öncesinde uygulanan ultrason ön işleminin kurutma davranışı ve termodinamik parametreler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Araştırmacılar geliştirdikleri özel kütle transfer modeliyle elde edilen verilerden, ultrasonun nem difüzyonunu hızlandırdığını, ürünün entalpi gereksinimini ve yağ içeriğini azalttığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca kurutulan ürünlerde daha düşük enerji tüketimi gözlemlenmiş, ürün kalitesi ve besin değerinin korunduğu tespit edilmiştir. Çalışma, ultrason ile air-frying yönteminin kombine olarak kullanımının hem ürün özelliklerini iyileştirdiğini hem de enerji açısından verimli olduğunu göstermiştir (Fikry *et al.* 2024)

Nwakuba *et al.* (2018) yaptıkları çalışmada titus ve sardalya balıklarının kurutma kinetiklerini hibrit solar-kömür dumanlama yöntemini kullanarak incelemişlerdir. Üç farklı fileto kalınlığında (3, 5 ve 7 mm) gerçekleştirilen deneysel verilere göre titus balıklarında en iyi uyumu Page modeli ($R^2=0,9985$), sardalya balıklarında ise Lewis modeli ($R^2=0,9995$) sağlamıştır. Titus balıklarında nemin yarıya düşmesi için geçen süre, fileto kalınlıklarına göre 90 ile 160 dakika arasında değişirken, sardalya balıklarında bu süre 60 ile 110 dakika arasında gerçekleşmiştir. Böylece çalışmanın bulguları, balık türünün ve fileto kalınlığının kurutma süresi ve model uyumu üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir.

Bir başka çalışmada ise mikrodalga kurutma yönteminin sardalya balığının kurutma kinetiği, etkin nem difüzyonu ve enerji tüketimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırmada, dört farklı mikrodalga gücü (200, 300, 400 ve 500 W) uygulanmış ve nem içeriğinin mikrodalga gücü arttıkça daha hızlı bir şekilde azaldığı, böylece kurutma süresinin önemli ölçüde kısaldığı belirlenmiştir. Elde edilen kurutma verileri beş farklı ince tabaka kurutma modeline

uygulanmış, sonuçlar R^2 , χ^2 ve RMSE gibi kriterlerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Sonuçta, sardalya balıklarının kurutma kinetiğini tanımlamak için en iyi uyumu Midilli modelinin gösterdiği ($R^2=0,9999$) ifade edilmiştir. Ayrıca, etkin nem difüzyon katsayısının mikrodalga gücüyle artarak $7,158 \times 10^{-8}$ ile $3,408 \times 10^{-7}$ m²/s arasında değiştiği belirlenmiştir. (Darvishi *et al.* 2013).

Zhang *et al.* (2012) yaptıkları çalışmada tilapia filetolarının mikrodalga kurutma kinetiklerini araştırmak amacıyla farklı mikrodalga güç seviyelerinde (150 W, 250 W, 500 W, 700 W ve 900 W) kurutma denemeleri gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen verilere on farklı matematiksel model uygulanarak, kuruma davranışına en iyi uyan model tespit edilmiştir. Bu bağlamda uygulanan koşullar altında en iyi uyumu Midilli modelinin sağladığı bildirilmiştir. Ayrıca, etkin nem difüzyon katsayısının (D_{eff}) mikrodalga gücünün artmasıyla birlikte $1,62 \times 10^{-9}$ m²/s'den $10,07 \times 10^{-9}$ m²/s'ye kadar arttığı gözlemlenmiştir.

Wang *et al.* (2011) yaptıkları çalışmada gümüş sazan filetolarının (*Hypophthalmichthys molitrix*) kurutma kinetiklerini ve fiziksel özelliklerini araştırmak amacıyla farklı sıcaklıklar (40, 50, 60 ve 70 °C) ve hava hızlarında (0.5 ve 1.5 m/s) konvektif kurutma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Araştırmada, kurutma sürecinin tüm koşullarda en iyi şekilde iki terimli model (Two-term model) ile tanımlandığı ve etkin nem difüzyon katsayısının (D_{eff}), sıcaklık ve hava hızına bağlı olarak 2.47×10^{-10} ile 5.98×10^{-10} m²/s aralığında değiştiği tespit edilmiştir.

MATERYAL VE METOT

Materyal

Araştırmada, avlanma sezonu içerisinde taze olarak temin edilen Atlantik palamutlarından (*Sarda sarda* Bloch, 1793) çıkarılan filetolar kullanılmıştır. Hammadde özelliklerini belirlemek için filetolarda nem, protein ve yağ içeriği analizleri yapılmıştır.

Metot

Örneklerin hazırlanması

Çalışmada, her bir palamut balığı filetosundan belirli boyutlarda (6×6×2,5 cm) iki örnek çıkarılmış (Şekil 1) ve bunlardan birine ultrason işlemi uygulanmıştır. Daha sonra, ultrason uygulanmış örnekler ile uygulanmamış örnekler belirli şartlar altında kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Aynı işlemler farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen her bir kurutma işleminde tekrarlanmıştır. Ayrıca kurutma işlemleri boyunca belirli aralıklarla örneklerde tartım alınmış olup ağırlık kaybından yola çıkılarak anlık nem içerikleri hesaplanmıştır.



Şekil 1. Palamut balığı filetolarından hazırlanan örnekler

Ultrason işlemi

Ultrason uygulanacak örnekler vakum ambalajlandıktan sonra ultrasonik su banyosu (Bandelin Electronic RK 512, Almanya) içersine yerleştirilmiş ve 35 kHz frekansında 20

dakika süreyle ultrason işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 2). Ultrason işleminde uygulanacak süreye ön denemeler sonucunda karar verilmiştir. Ultrason işlemi boyunca su banyosunun sabit sıcaklıkta kalması için buz ilavesi gerçekleştirilmiştir. Uygulama sonrası ambalajlarından çıkarılan örnekler kurutma işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 2. Örnekler üzerine uygulanan ultrason işlemi

Kurutma işlemi

Kurutma işlemi sıcaklık, bağıl nem ve hava akış hızının ayarlanabildiği, endüstriyel nitelikte programlanabilir bir kurutma ünitesinde (Mauting, Çekya) yapılmıştır. Hem ultrason uygulanan hem de uygulanmayan örnekler daha önce kurutulmuş ve darası alınmış alüminyum kaplar içersine yerleştirilmiş ve kurutma işlemi üç farklı sıcaklıkta (40, 50 ve 60 °C), %30 bağıl nemde ve 1 m/s hava akış hızında gerçekleştirilmiştir. Her bir sıcaklık için ultrason uygulanmış ve uygulanmamış numuneler aynı anda kurutma kabinine yerleştirilmiş ve kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Bu yöntemle, hem sıcaklığın kuruma davranışı üzerindeki etkileri hem de ultrason ön işleminin kurutma işlemine etkisi karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Her üç sıcaklık için de kurutma işlemine toplamda 72 saat boyunca devam edilmiştir. Kurutma işleminin özellikle ilk 10 saatlik zaman diliminde, numunelerdeki nem kaybının dinamik değişimini hassas şekilde takip etmek amacıyla yakın aralıklı ölçüm protokolü uygulanmıştır. Bu süre boyunca numunelerin kütleleri her saat başında dikkatle tartılarak ağırlıkları tespit edilmiştir. Kurutma süresinin devamında, nem kaybı hızındaki düşüş göz önünde bulundurularak, ölçüm aralıkları dört saate bir olacak şekilde ayarlanmıştır. Kurutma süresi boyunca tespit edilen ağırlık kayıplarından yola çıkılarak örneklerdeki anlık nem içerikleri

hesaplanmış (Mt) ve zamana bağılı nem oranı (MR) eğrileri oluşturulmuştur. Kurutma işleminin tamamlandığı 72. saatte örneklerde (Şekil 3) belirlenen nem içeriği, numunedeki su kaybının dengeye ulaştığı kabul edilerek, denge nem içeriği (Me) olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 3. Kurutma işlemi sonunda elde edilen numunelerin görünümü

Nem tayini

Yaklaşık 10 g örnek kurutma kabı içersinde 100-102°C sıcaklıkta sabit ağırlığa ulaşuncaya kadar kurutulmuş ve ağırlık kaybından yola çıkılarak nem içeriği yüzde (%) olarak hesaplanmıştır. Her numune için ölçümler üç paralel hâlinde yapılmış ve ortalama değerler verilmiştir (AOAC 2005).

Yağ tayini

Yağ tayini AOAC International (AOAC 2005) tarafından verilen solvent ekstraksiyon yöntemi esas alınarak yapılmıştır. Analizde nem tayininden elde edilen kurutulmuş balık örnekleri kullanılmıştır. Kurutma kapları içindeki örnekler ekstraksiyon timbillerine aktarılmış ve bu timbiller ekstraksiyon ünitesine uygun şekilde yerleştirilmiştir. Daha önce kurutularak darası alınmış ekstraksiyon balonlarına petrol eteri konularak sistem çalıştırılmıştır. Ekstraksiyon işlemine 8 saat devam edildikten sonra ekstraksiyon balonlarında toplanmış olan yağ miktarından yola çıkılarak % yağ miktarı hesaplanmıştır.

Ham protein tayini

Ham protein tayini için yaklaşık 2,5 g örnek azot içermeyen bir parça filtre kağıdına tartılmış ve Kjeldahl balonu içerisine aktarılmıştır. Üzerine 10:1 oranında K₂SO₄ ve CuSO₄

içeren katalizör karışımı ile 25ml derişik H₂SO₄ ilave edilmiştir. Kjeldahl balonu yakma ünitesine yerleştirilmiş ve berrak mavi-yeşil renk elde edilinceye kadar yakma işlemi yapılmıştır. Yakma işlemi tamamlanınca, Kjeldahl balonu oda sıcaklığına kadar soğutulmuş ve içerisine 400ml saf su ve 75ml doymuş NaOH ilave edilerek distilasyon sistemine bağlanmıştır. Distilasyon sisteminin kondensat çıkışına içerisinde 50ml %4'lük borik asit çözeltisi ve 1ml indikatör (metil kırmızısı ve brom kresol yeşili içerir) bulunan 500ml'lik erlenmayer yerleştirilmiştir. Distilasyon işlemine erlenmayerdeki toplam hacim 250ml oluncaya kadar devam edilmiştir. Elde edilen distilat 0,1N HCl ile çelik gri renk oluncaya kadar titre edilmiş, sonuçta % protein içeriği aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır (Gökalp vd. 2010).

$$\%Protein = (V - V_0) \times 0,014 \times N \times 100 \times 6,25/m$$

Burada; V, titrasyonda harcanan HCl çözeltisinin hacmi (ml); V₀, Şahit numune için titrasyonda harcanan HCl çözeltisinin hacmi (ml); N, ayarlanmış HCl çözeltisinin derişimi; m, örnek ağırlığı (g).

Kurutma kinetikleri

Kurutma işlemi süresince, palamut örneklerindeki zamana bağılı olarak değişen nem oranı (Moisture Ratio – MR), deneysel ölçüm sonuçları temel alınarak aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanmıştır.

$$MR = \frac{M - Me}{M_i - Me}$$

Denklemden, MR, nem oranını; M_t , belirli bir andaki nem içeriğini (kg su/kg kuru madde); M_i , başlangıç nem içeriğini (kg su/kg kuru madde); Me , ise denge nem içeriğini (kg su/kg kuru madde) göstermektedir.

Elde edilen nem oranı verileri, daha sonra kurutma süresine göre zamana bağılı olarak bir grafiğe aktarılmıştır. Böylece her bir sıcaklık ve ön işlem koşuluna ait nem oranı (MR) eğrileri oluşturulmuştur. Bu grafikler kurutma davranışının görsel olarak analiz edilmesine, farklı gruplar arasındaki nem kaybı eğilimlerinin karşılaştırılmasına ve modelleme çalışmalarına temel teşkil etmiştir (MacManus Chinenye *et al.* 2010). Bu bağlamda, MR eğrileri, hem kurutma kinetiği modellerinin doğruluğunu değerlendirmek hem de ultrason ön işleminin kuruma üzerindeki etkilerini görselleştirmek açısından önemlilik arz etmektedir.

Kurutma işlemi boyunca her bir sıcaklık düzeyi ve ön işlem koşulu için farklı zaman dilimlerinde elde edilen nem içerikleri, nem oranlarının hesaplanmasında kullanılmıştır. Bu veriler ise kurutma süresine bağılı olarak oluşan nem kaybının karakterize edilmesini sağlamak amacıyla, Tablo 1'de verilen ince tabaka kurutma modellerine uygulanmıştır. Böylece

bulguların matematiksel olarak modellenmesi ve kurutma davranışını en uygun şekilde temsil eden fonksiyonun belirlenmesi amaçlanmıştır.

Tablo 1. Kurutma Özelliklerinin İncelenmesinde Kullanılan Matematiksel Modeller (Onyenwigwe *et al.* 2023)

Model adı	Model denklemi
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
Two-term exponential	$MR = a \exp(-k_1t) + b \exp(-gt)$

Modelleme işlemleri, doğrusal olmayan regresyon (non-linear regression) teknikleri kullanılarak yürütülmüştür. Bu kapsamda ileri düzey sayısal hesaplama kapasitesine sahip olan MATLAB yazılımı (MathWorks R2025, 2025) tercih edilmiştir. Modelleme sürecinde, her bir matematiksel modelin deneysel verilere ne derece uygunluk gösterdiğini belirlemek amacıyla belirleme katsayısı (R^2), kök ortalama kare hata (RMSE) ve toplam hata kareleri toplamı (SSE) gibi temel istatistiksel uygunluk kriterleri esas alınmıştır. Bu ölçütler üzerinden yapılan karşılaştırmalar sonucunda, çalışmada elde edilen kurutma verilerini en doğru biçimde temsil eden model belirlenmiş ve bu modelin hem kontrol grubu hem de ultrason ön işlemlili numuneler için sağladığı performans ortaya konulmuştur.

Uygun modelin belirlenmesinde, korelasyon katsayısının (R^2) yüksek; hata kareler toplamının (SSE), azaltılmış ki-kare (χ^2) ve ortalama kare hatasının (RMSE) ise düşük olması temel ölçüt olarak kullanılmıştır. Bu değerler, aşağıda verilen denklemler aracılığıyla hesaplanmıştır (Aregbesola *et al.* 2022; Onyenwigwe *et al.* 2023).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR_{exp,i}})^2}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})}{N - n}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2}$$

$$SSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{(exp,i)} - MR_{(pred,i)})^2$$

Burada, MR_{pre} , i'inci tahmin edilen nem oranını; MR_{exp} , i'inci deneysel olarak gözlemlenen nem oranını ifade etmektedir. N ve n, sırasıyla gözlem sayısını ve sabitleri temsil etmektedir.

Nem difüzyon katsayısının belirlenmesi

Kurutma işlemi sırasında numunelerdeki etkin nem difüzyon katsayılarının (D_{eff}) belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan teorik modellerden biri olan Fick'in ikinci yasasına dayanan yaklaşım esas alınmıştır. Özellikle sonsuz düzlem geometrisine sahip katı örnekler için geçerli olan ve bir boyutlu nem difüzyonunun zamana bağlı çözümünü veren Fick'in ikinci denkleminin analitik çözümü kullanılmıştır. Bu bağlamda, aşağıda sunulan eşitlik, Crank (1975) tarafından geliştirilen kuramsal model çerçevesinde değerlendirilmiş ve deneysel verilerle uyumlu biçimde uygulanmıştır. Söz konusu denklem, numune içerisinde nemin iç difüzyonunu nicel olarak açıklayabilmek amacıyla tercih edilmiştir

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp(-D_{eff}(2n+1)^2\pi^2 t/L^2)$$

Eşitlikte yer alan D_{eff} , kurutma sürecinde nemin numune içerisindeki yayılım hızını temsil eden etkin difüzyon katsayısını (m^2/s); t, kurutma işlemi boyunca geçen zamanı (s); L ise kurutulan numunenin kalınlığını (m) ifade etmektedir. Bu parametreler, nemin iç yapıda nasıl hareket ettiğini belirlemek açısından kurutma kinetiği analizlerinin temel değişkenleridir.

Söz konusu eşitlikte, kurutma sürecinin matematiksel olarak modellenebilmesi amacıyla yalnızca ilk terim dikkate alınmış, bu sayede denklem basitleştirilerek lineer forma dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm, genellikle düşük nem içeriklerinde daha karmaşık terimlerin ihmal edilebileceği varsayımına dayanır. Lineerleştirme işlemi sonrasında, zaman (t) eksenine karşılık $\ln(MR)$ (doğal logaritması alınmış nem oranı) değerlerinin grafiği çizilmiş ve bu grafiğin doğrusal eğrisi üzerinden elde edilen eğim (k) yardımıyla D_{eff} değeri hesaplanmıştır.

Bu yaklaşım, hem basitleştirilmiş matematiksel formülasyonun pratik bir uygulamasıdır hem de deneysel verilerden difüzyon katsayısını çıkarmak için literatürde yaygın olarak kullanılan güvenilir bir yöntemdir. Bu duruma ilişkin kullanılan eşitlikler ve dönüşümler aşağıda ayrıntılı biçimde sunulmuştur.

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{D_{eff}\pi^2 t}{L^2}\right)$$

$$k = \left(\frac{D_{eff}\pi^2}{L^2}\right)$$

Aktivasyon enerjisi

Aktivasyon enerjisi (E_a), sıcaklığın etkin nem difüzyon katsayısı üzerindeki etkisini nicel olarak ortaya koymak amacıyla, deneysel olarak elde edilen D_{eff} değerlerine uygulanan Arrhenius tipi bir denklem yardımıyla hesaplanmıştır. Bu hesaplama sürecinde, farklı sıcaklıklarda elde edilen D_{eff} değerleri, ilgili denklemin logaritmik dönüşümüne tabi tutulmuş ve elde edilen doğrusal grafik eğimi üzerinden E_a değeri belirlenmiştir.

$$D_{eff} = D_o \exp\left(-\frac{E_a}{RT_a}\right)$$

Burada, E_a aktivasyon enerjisini (kJ/mol), R evrensel gaz sabitini (8.3143 kJ/mol·K), T_a mutlak hava sıcaklığını (K cinsinden) ve D_o Arrhenius tipi denklemin ön-üstel parametresini (m²/s) ifade etmektedir.

Etkin nem difüzyon katsayısının (D_{eff}) doğal logaritması ($\ln(D_{eff})$) ile mutlak sıcaklığın ters değeri ($1/T$, K⁻¹) arasında çizilen grafik, K_1 eğimine sahip doğrusal bir eğriyi vermektedir. Bu doğrusal ilişki, klasik Arrhenius denkleminde dayanmaktadır ve sıcaklığın difüzyon üzerindeki etkisini sayısal olarak analiz etmede kullanılmaktadır. Ayrıca bu eğrinin eğimi olan K_1 değeri, evrensel gaz sabiti ($R = 8.314$ J/mol·K) ile çarpılarak, örneklerin kurutulma sürecinde su moleküllerinin difüze olması için gereken enerji miktarını ifade eden aktivasyon enerjisi (E_a) olarak hesaplanmaktadır. Bu hesaplama, sıcaklık artışına karşılık D_{Deff} değerinde meydana gelen artışın enerji temelli olarak açıklanmasını sağlamaktadır ve nem transferinin sıcaklık bağımlılığını nicel olarak ortaya koymaktadır.

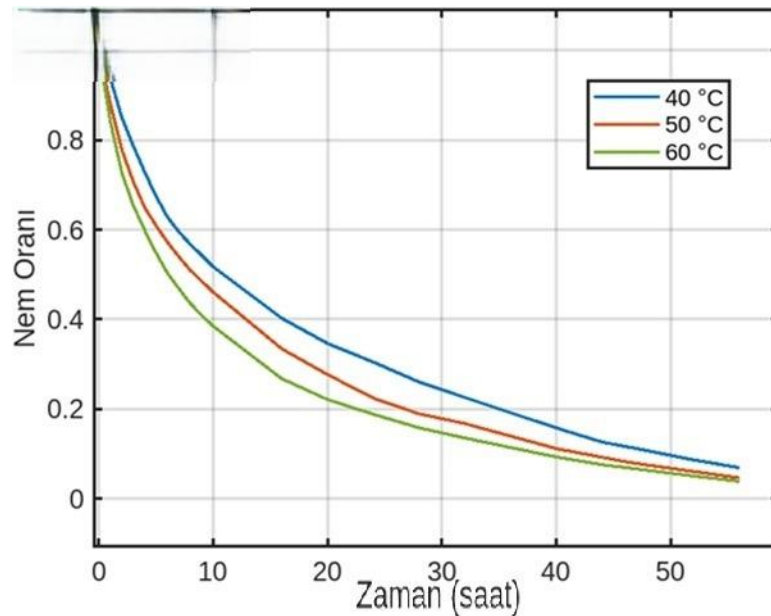
$$K_1 = \frac{E_a}{R}$$

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

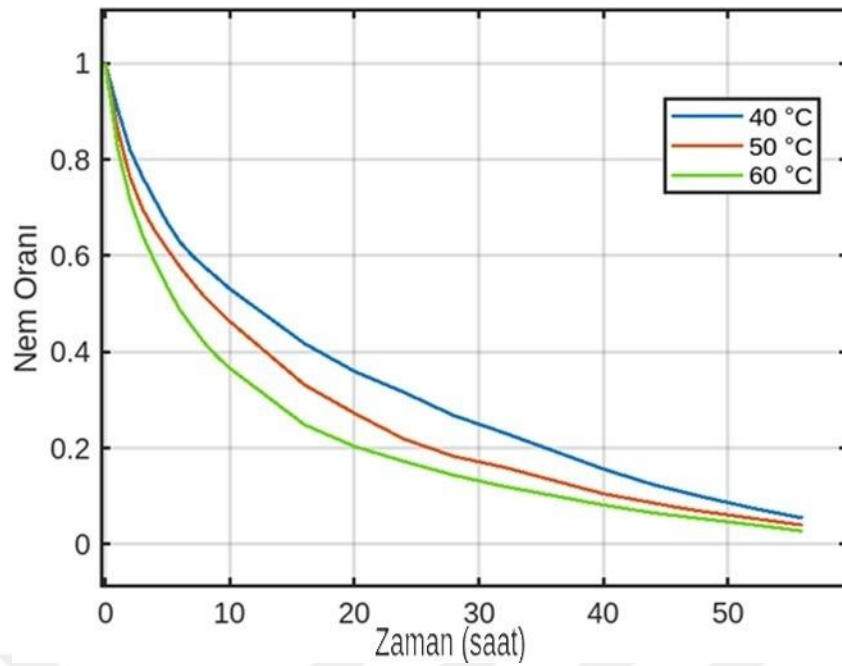
Çalışmada, hammadde olarak kullanılan Atlantik palamudu (*Sarda sarda*) filetolarının nem içeriği ile ham protein ve yağ miktarları belirlenmiştir. Bu bağlamda palamut örneklerinin nem içeriği ortalama %58,35 olarak bulunmuş ve bu değerin palamut gibi yağlı balıkların tipik nem aralığında yer aldığı görülmüştür. Nitekim, Saygun (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, palamut balığında nem içeriği %55,17 olarak bulunmuştur. Yapılan bir başka çalışmada da benzer bir sonuç rapor edilmiştir (Altan vd. 2022). Diğer yandan mevcut bu çalışmada hammaddenin ham protein miktarı %22,22 ve yağ miktarı %18,94 olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Özden (2010) tarafından palamut balığı için tespit edilen protein ve yağ miktarlarıyla benzerlik göstermektedir.

Nem Oranları

Palamut balıklarında 40°C, 50°C ve 60°C sıcaklıklarda kurutma işlemi esnasında belirlenen ağırlık ölçümleri ve nem içerikleri kullanılarak elde edilen nem oranı – zaman eğrileri kontrol ve ultrason ön işlemlili örnekler için sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5’te verilmiştir. Atlantik palamudu filetoları için nem oranı – zaman eğrileri incelendiğinde sıcaklık artışının kurutma hızını belirgin biçimde artırdığı görülmektedir. Ayrıca aynı sıcaklıkta ultrason ön işlemi uygulanan örneklerin kontrol örneklerine kıyasla kuruma eğrisini daha aşağı kaydırıldığı görülmüştür.



Şekil 4. Farklı sıcaklıklarda kontrol örneklerinde zamana bağlı olarak belirlenen nem oranı değişim eğrisi



Şekil 5. Farklı sıcaklıklarda ultrason ön işlemleri örnekte zamana bağlı olarak belirlenen nem oranı değişim eğrisi

Kurutma Kinetikleri ve Modellerin Uyum Analizi

Kütle transferi parametreleri ile kurutma kinetiğinin anlaşılması, yeni kurutma sistemlerinin tasarımı veya mevcut proseslerin etkinliğinin artırılması amacıyla gerçekleştirilecek optimizasyon çalışmaları için son derece önemlidir. Söz konusu bu mühendislik uygulamaları hem deneysel gözlemler hem de gözlemlerin matematiksel modelleme yoluyla analitik bir çerçeveye oturtulması şeklinde gerçekleştirilmektedir. Kurutma sürecinin teorik olarak tanımlanabilmesi ve sürecin kontrol altına alınabilmesi için özellikle ince tabaka kurutma modelleri sıklıkla kullanılmaktadır (Erbay and Icier 2010). Bu çalışmada da tarımsal ve gıda ürünlerinin kurutulması üzerine yapılan önceki çalışmalarda sıklıkla kullanılmış olmaları ve farklı kurutma koşullarında yüksek uyum sağlamaları nedenleriyle Newton, Page, Midilli, Henderson–Pabis, Logaritmik ve Two-Term Exponential modelleri uygulanmıştır. Modellerin uygulanması sırasında her bir modelin denklemi kurutma verilerine doğrusal veya doğrusal olmayan regresyon analizleriyle uygulanmış ve model parametreleri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Modellemenin başarısı, belirleme katsayısının (R^2) yani modelin deneysel verileri açıklama gücünün yüksek olması ve kök-ortalama-kare hata (Root Mean Square Error – RMSE) ve ki-kare (χ^2) değerlerinin düşük olması yani tahmin edilen değerlerin gözlemlenen değerlerle tutarlılığının yüksekliği üzerinden değerlendirilmiştir. Bu üç temel parametre, modelin genel uyumunun kantitatif olarak analiz edilmesini sağlamaktadır. Yarı-teorik modeller, Fick'in ikinci yasasının sadeleştirilmiş genel seri çözümleridir. Ancak bu modeller, yalnızca geliştirildikleri koşullar (sıcaklık, bağıl nem, hava hızı ve nem içeriği) altında geçerlilik göstermektedir. Diğer yandan yarı-teorik modellerde zaman gereksinimi daha

az olup kurutulan materyalin şekli dikkate alınmamaktadır. Bu modeller arasında Two-Term modeli, Henderson ve Pabis modeli, Lewis modeli, Page modeli ve Modifiye Page modeli yer almaktadır (Inyang, *et al.* 2018).

Çalışmada elde edilen sonuçlar, her bir modelin farklı koşullar altında deneysel verilerle ne derece uyum sağladığını ortaya koymuştur. Modellerin tümünde R^2 için 0,944 ile 1,000 arasında değişen değerler tespit edilmiş olup bu da incelenen tüm modellerin istatistiksel olarak anlamlı ve kabul edilebilir düzeyde veri uyumu gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, özellikle bazı modellerin belirli sıcaklık aralıklarında veya belirli kurutma yöntemlerinde daha iyi uyum sağladığı ifade edilmiştir (Başlar *et al.* 2015).

Kontrol grubu palamut örneklerine ait model uyum sonuçları Tablo 2’de verilmiştir. Araştırmada kontrol örneklerinde Midilli modelinin en yüksek uyumu gösterdiği tespit edilmiştir ($R^2 = 0,9973-0,9993$; $RMSE \leq 0,0148$). Uyum analizinde Page modelini ikinci sırada yer aldığı, Two-Term Exponential modelinin ise ek parametrelerine rağmen Page modeline göre daha az bir uyum gösterdiği tespit edilmiştir. Newton ile Henderson-Pabis modelleri ise en düşük uyum seviyelerini göstermişlerdir.

Tablo 2. Kontrol Grubu Palamut Örneklerine Ait Model Uyum Sonuçları

Model	Sıcaklık	Model Katsayıları	R^2	RMSE	SSE	X^2
Page	40	K= 0,1079, n= 0,7738	0,9967	0,0164	0,0057	0,0174
	50	K= 0,1496, n= 0,7254	0,9990	0,0088	0,0016	0,0082
	60	K= 0,2000, n= 0,6764	0,9993	0,0075	0,0012	0,0055
Newton	40	K= 0,0585	0,9675	0,0516	0,0560	0,2854
	50	K= 0,0771	0,9566	0,0579	0,0671	0,6047
	60	K= 0,0990	0,9454	0,0641	0,0864	2,1550
Midilli	40	a= 1,0239, k= 0,1260 n= 0,7140, b= -0,0006	0,9973	0,0148	0,0046	0,0093
	50	a= 1,0080, k= 0,1607 n= 0,6889, b= -0,0005	0,9993	0,0072	0,0010	0,0019
	60	a= 1,0087, k= 0,2061 n= 0,6672, b= -0,0000	0,9993	0,0072	0,0011	0,0049
Henderson and Pabis	40	a= 0,9186, k= 0,0504	0,9820	0,0384	0,0309	0,0857
	50	a= 0,8912, k= 0,0626	0,9796	0,0397	0,0315	0,1403
	60	a= 0,8731, k= 0,0774	0,9693	0,0481	0,0486	0,5276
Logarithmic	40	a= 0,8652, k= 0,0682 c= 0,0912	0,9895	0,0293	0,0181	0,0654
	50	a= 0,8477, k= 0,0832 c= 0,0812	0,9888	0,0294	0,0173	0,0630
	60	a= 0,8411, k= 0,1073 c= 0,0824	0,9866	0,0318	0,0212	0,1038

Tablo 2. (devamı)

Two-term Exponential	40	a= 0,7398, k= 0,0389 b= 0,2761, g= 0,2725	0,9989	0,0095	0,0019	0,0080
	50	a= 0,7329, k= 0,0480 b= 0,2694, g= 0,4224	0,9998	0,0042	0,0003	0,0017
	60	a= 0,6074, k= 0,0484 b= 0,3858, g= 0,3573	0,9995	0,0060	0,0007	0,0028

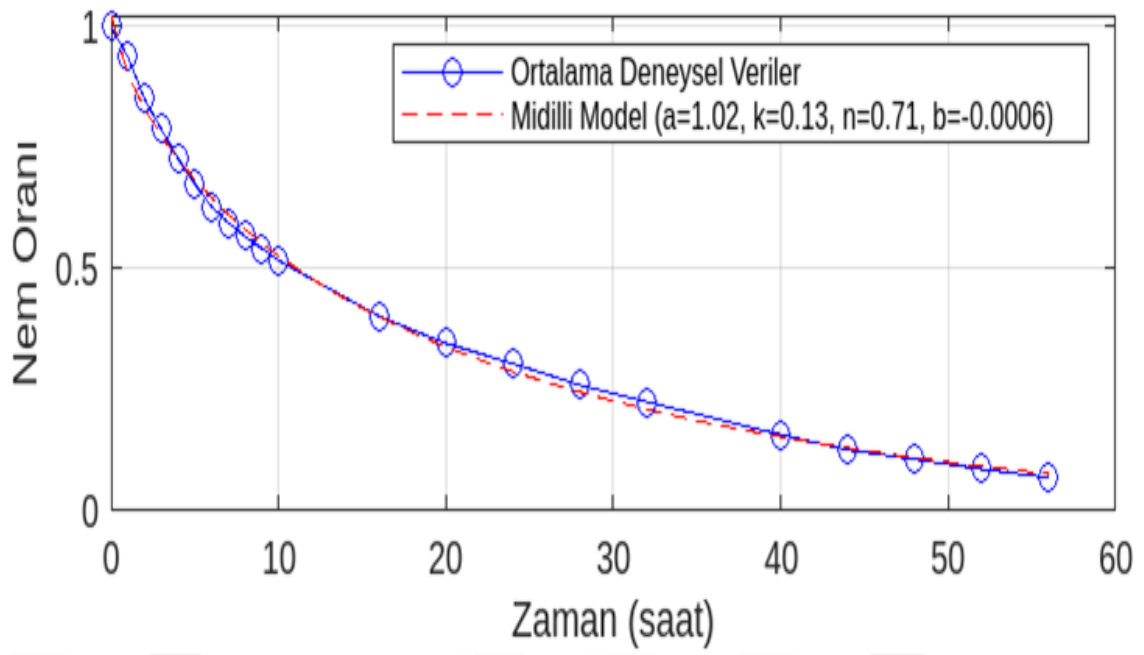
Ultrason ön işlemleri uygulanmış palamut örneklerine ait model uyum sonuçları Tablo 3’te verilmiştir. Ultrason işlemleri uygulanmış numunelerde model performansları incelendiğinde, Midilli modeli düşük ve yüksek sıcaklıklarda en başarılı uyumu sağlamıştır (40°C’de $R^2 = 0,9990$, RMSE = 0,0090; 60°C’de $R^2 = 0,9996$, RMSE = 0,0058). Buna karşılık Two-Term Exponential modelinin 50°C’de öne çıktığı görülmektedir ($R^2 = 0,9998$, RMSE = 0,0044). Page modelinin bütün sıcaklıklarda ikinci planda kaldığı ($R^2 \leq 0,9995$; $RMSE \geq 0,0061$), Newton ve Henderson–Pabis modellerinde ise en düşük uyumluluk değerlerinin elde edildiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, ultrason uygulaması ile kurutma sıcaklığının kütle transfer mekanizmasını etkileyerek model uyumluluğunu etkilediğini göstermektedir.

Literatürdeki bir çok çalışmada çeşitli gıda ürünlerinin kurutulması açısından bu çalışmada yer alan altı model en uygun modeller olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte balıkların kurutulması için en uygun modellerin Midilli ile Two-Term modelleri olduğu bildirilmiştir (Toujani *et al.* 2013). Wang *et al.* (2011) yaptıkları bir çalışmada konvektif kurutma yöntemi kullanılarak gümüş sazan (*silver carp*) filetosunun matematiksel modellenmesinde en iyi uyumu Two-Term modellerinin sağladığını bildirmişlerdir. Midilli modeli, mikrodalga ile kurutulan tilapia filetoları (Zhang *et al.*, 2012) ve sardalya balıkları (Darvishi *et al.* 2013) için en iyi uyumu sağlamıştır. Toujani *et al.* (2013) Two-Term modeli ile Midilli modelinin, silverside balığının konvektif kurutma sürecini yeterli doğrulukla öngörebildiğini rapor etmişlerdir. Başka bir çalışmada ise Page modeli ile Lewis modeli, hibrit güneş-kömür balık kurutucusunda titus ve sardalya türlerinin kurutma kinetiklerinin tanımlanmasında en uygun ince tabaka kurutma modelleri olarak belirlenmiştir (Nwakuba *et al.* 2018).

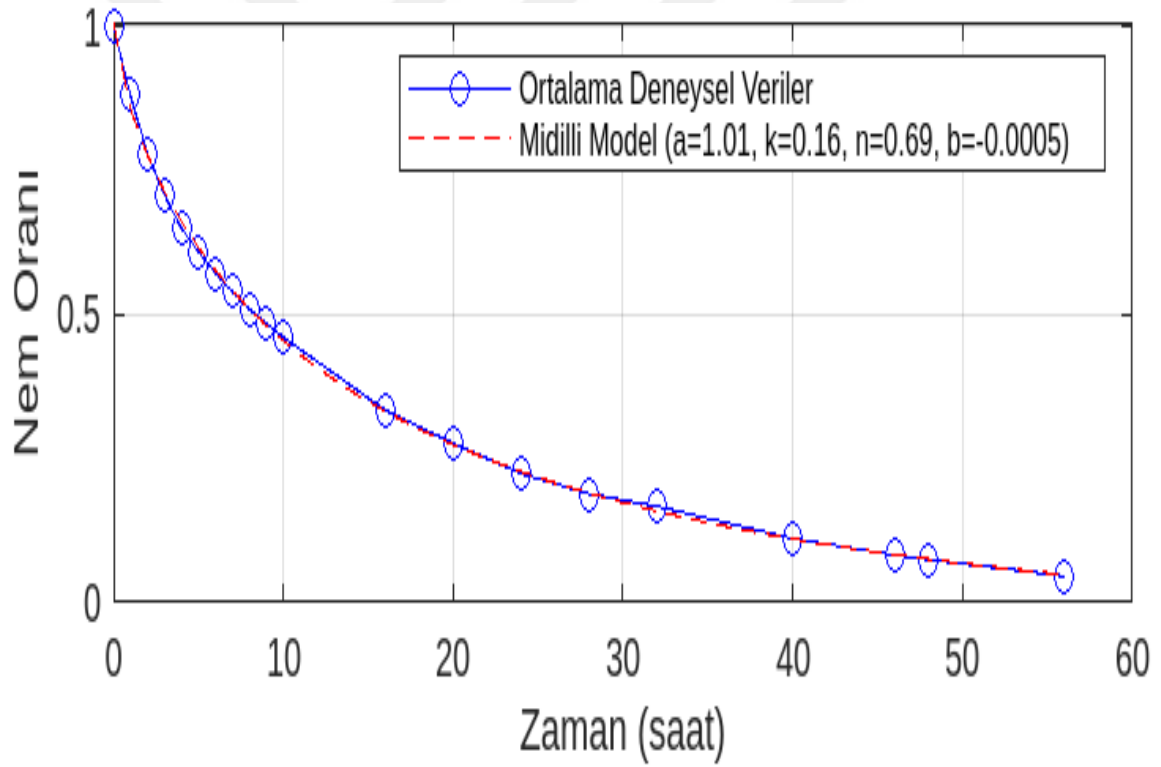
Farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen kurutma işlemleri için en yüksek uyum katsayısına sahip kurutma modellerinin grafiksel gösterimleri kontrol örnekleri için sırasıyla Şekil 7, 8 ve 9’da, ultrason işlemleri uygulanmış örnekler için ise sırasıyla Şekil 10, 11 ve 12’de sunulmuştur. Bu grafikler, her bir sıcaklık ve ön işlem koşulu için en iyi performansı gösteren modellerin deneysel verilerle olan ilişkisini görsel olarak ortaya koymaktadır.

Tablo 3. Ultrason Ön İşlemi Uygulanmış Palamut Örneklerine Ait Model Uyum Sonuçları

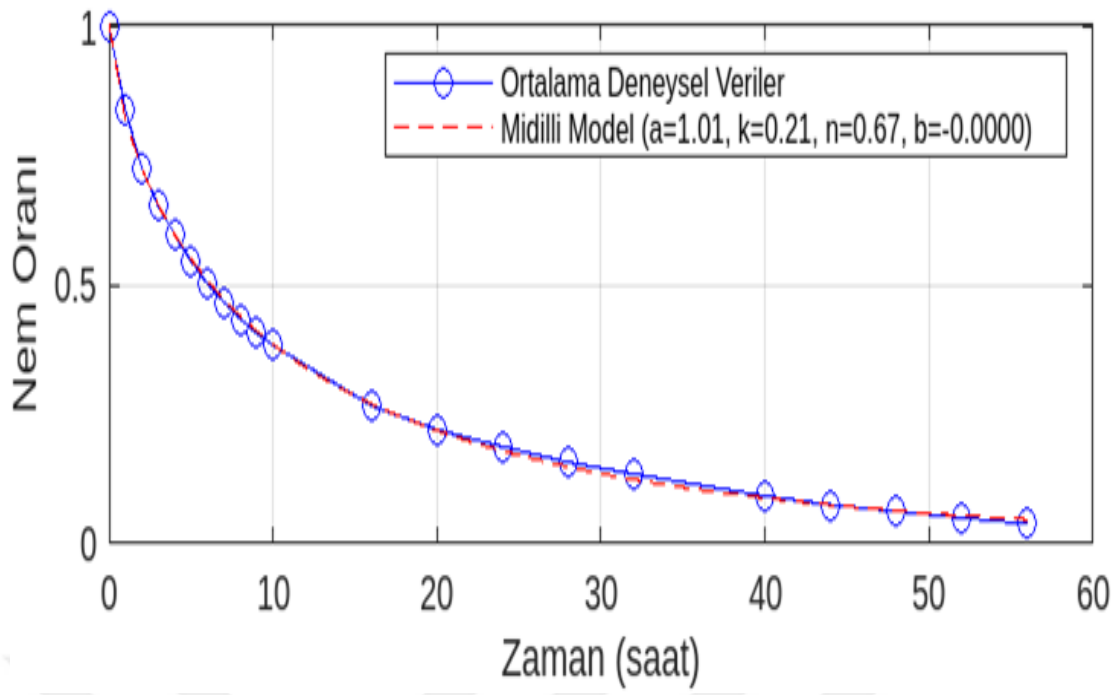
Model	Sıcaklık	Model Katsayıları	R ²	RMSE	SSE	X ²
Page	40	K= 0,1131, n= 0,7558	0,9959	0,0181	0,0069	0,0420
	50	K= 0,1503, n= 0,7270	0,9986	0,0105	0,0022	0,0138
	60	K= 0,2099, n= 0,6780	0,9995	0,0061	0,0008	0,0077
Newton	40	K= 0,0579	0,9602	0,0561	0,0662	0,2441
	50	K= 0,0777	0,9573	0,0575	0,0662	0,5142
	60	K= 0,1063	0,9497	0,0617	0,0800	2,2314
Midilli	40	a= 1,0119, k= 0,1388 n= 0,6396, b= -0,0019	0,9990	0,0090	0,0017	0,0033
	50	a= 1,0018, k= 0,1622 n= 0,6779, b= -0,0008	0,9995	0,0061	0,0007	0,0018
	60	a= 1,0065, k= 0,2161 n= 0,6659, b= -0,0001	0,9996	0,0058	0,0007	0,0055
Henderson and Pabis	40	a= 0,8997, k= 0,0482	0,9841	0,0355	0,0265	0,0543
	50	a= 0,8870, k= 0,0627	0,9824	0,0370	0,0274	0,1018
	60	a= 0,8753, k= 0,0840	0,9715	0,0464	0,0453	0,5744
Logarithmic	40	a= 0,8591, k= 0,0587 c= 0,0627	0,9868	0,0323	0,0219	0,0692
	50	a= 0,8488, k= 0,0793 c= 0,0684	0,9886	0,0297	0,0177	0,0570
	60	a= 0,8464, k= 0,1117 c= 0,0731	0,9865	0,0320	0,0214	0,1146
Two-term Exponential	40	a= 0,2124, k= 0,4325 b= 0,7918, g= 0,0403	0,9987	0,0098	0,0021	0,0151
	50	a= 0,7731, k= 0,0513 b= 0,2293, g= 0,6052	0,9998	0,0044	0,0004	0,0023
	60	a= 0,3813, k= 0,3818 b= 0,6091, g= 0,0525	0,9993	0,0073	0,0011	0,0048



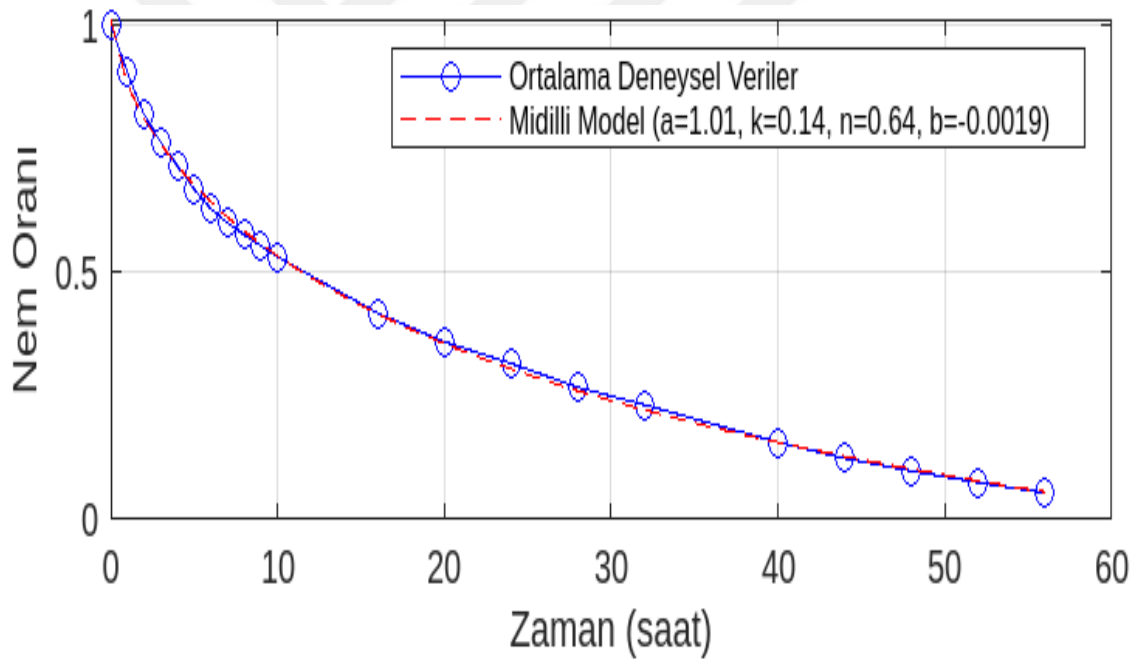
Şekil 6. Kontrol gurubu örneklerinde 40 °C de Midilli modeli uyum grafiği



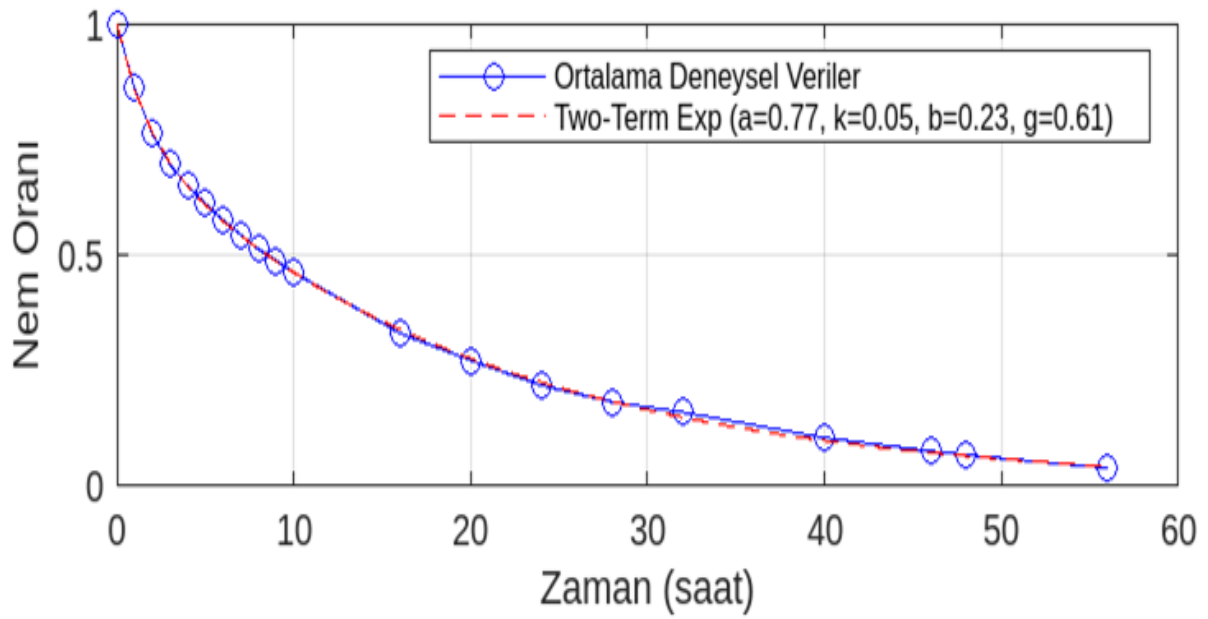
Şekil 7. Kontrol gurubu örneklerinde 50 °C de Midilli modeli uyum grafiği



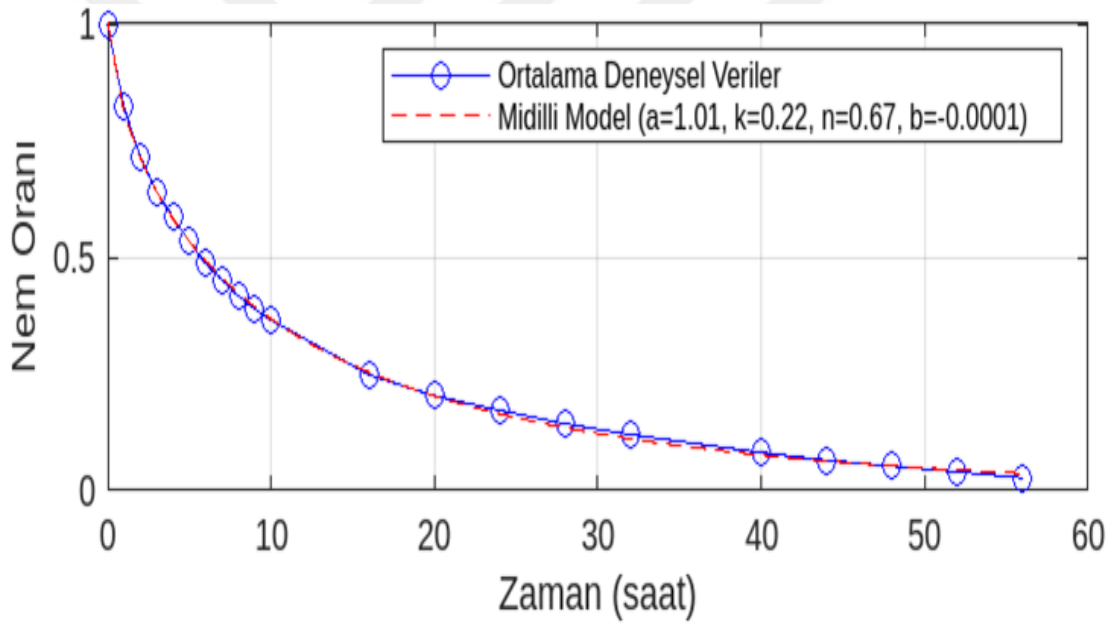
Şekil 8. Kontrol gurubu örneklerinde 60 °C de Midilli modeli uyum grafiği



Şekil 9. Ultrason işlemi uygulanmış örneklerin 40 °C’de midilli modeli uyum grafiği



Şekil 10. Ultrason işlemi uygulanmış örneklerin 50 °C’de Two-Term Exponential modeli uyum grafiği



Şekil 11. Ultrason işlemi uygulanmış örneklerin 60 °C’de midilli modeli uyum grafiği

Nem Difüzyon Katsayısı

Araştırmada ultrason ön işlemi uygulanmamış kontrol örnekleri ile ultrason ön işlemine tabi tutulmuş Atlantik palamudu örnekleri için 40°C, 50°C ve 60°C’de belirlenen etkin nem difüzyon katsayısı (D_{eff}) değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Tüm sıcaklıklar için iki paralelli olarak yürütülen çalışmada altı D_{eff} değeri elde edilmiştir. Belirlenen bu değerlerin $4,85 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ – $6,41 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ arasında olduğu ve Panagiotou *et al.* (2004) tarafından bildirilen balıkların kurutulması sırasında genel olarak kabul edilen D_{eff} aralığı (10^{-11} – $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$) içerisinde yer aldığı görülmüştür.

Tablo 4. Farklı Sıcaklıklarda Belirlenen Etkin Nem Difüzyon Katsayısı (D_{eff}) Değerleri

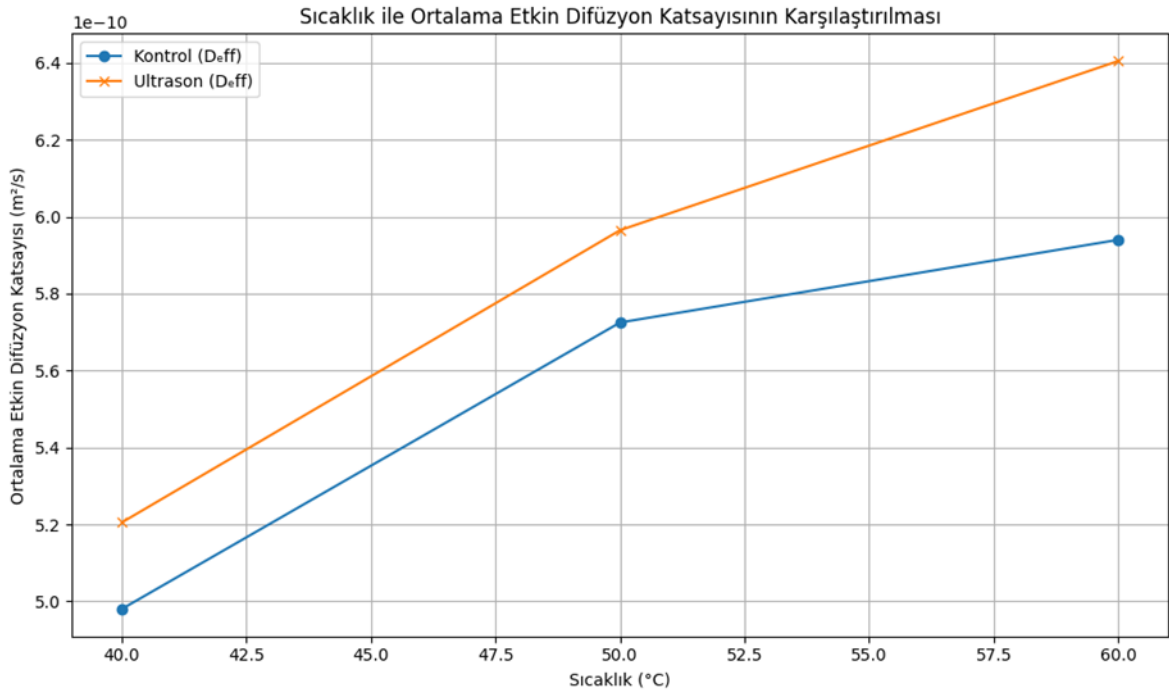
Sıcaklık (°C)		Nem D_{eff} değerleri (m ² /s)	
		Kontrol	Ultrason Ön İşlemli
40	1	$5,11 \times 10^{-10}$	$5,31 \times 10^{-10}$
	2	$4,85 \times 10^{-10}$	$5,10 \times 10^{-10}$
50	1	$5,65 \times 10^{-10}$	$5,94 \times 10^{-10}$
	2	$5,80 \times 10^{-10}$	$5,99 \times 10^{-10}$
60	1	$5,93 \times 10^{-10}$	$6,40 \times 10^{-10}$
	2	$5,95 \times 10^{-10}$	$6,41 \times 10^{-10}$

Atlantik palamudu örneklerinde belirlenen nem D_{eff} ($4,85 \times 10^{-10}$ – $6,41 \times 10^{-10}$ m²/s) değerlerine benzer sonuçlar Başlar *et al.* (2015) tarafından yapılan bir çalışmada 55 – 75°C’de sıcak hava ile kurutulan somon ve alabalık filetoları için de bildirilmiştir. Bu çalışmada nem D_{eff} değerinin $5,43 \times 10^{-10}$ – $7,40 \times 10^{-10}$ m²/s arasında olduğu belirtilmiş, ancak ultrasonik vakum (USV) tekniğiyle kurutulan örneklerde daha yüksek nem difüzyon katsayılarının ($7,49 \times 10^{-10}$ – $1,95 \times 10^{-9}$ m²/s) elde edildiği rapor edilmiştir. Özellikle 60°C’de USV işlemi uygulanan somonda $1,35 \times 10^{-9}$ m²/s’lik D_{eff} değerinin, mevcut bu çalışmada palamut balığında belirlenen $6,41 \times 10^{-10}$ m²/s’lik D_{eff} değerine kıyasla yaklaşık iki kat daha büyük olduğu görülmektedir. Bu bağlamda ultrason uygulamasının kurutma kinetiğini hızlandırıcı etkisinin balık türüne bağlı olarak değişiklik gösterebileceğini söylemek mümkündür. Bununla birlikte bahsedilen çalışmada ultrason işleminin vakum altında ve kurutma işlemi esnasında uygulandığı da dikkate alınmalıdır. Palamut balığının kas lifleri arasındaki bağ dokusu yoğun kollajen içermekte olup kompakt bir ağ oluşturarak lifleri sıkıca sarmaktadır. Lifler arası mikro-boşlukların sınırlı olması nedeniyle, su moleküllerinin kas içinden yüzeye difüze olmasının zorlaştığı ve bu nedenle etkin nem difüzyon katsayısının (D_{eff}) düştüğü ifade edilmektedir. Nitekim kurutma sürecinin daha gevşek ve gözenekli yapıya sahip olan uskumru veya somon gibi türlere kıyasla palamut etinde daha yavaş ilerlediği bildirilmiştir (Ozuna *et al.* 2014; Ellerby *et al.* 2000). Ayrıca Medina-Vivanco *et al.* (2002) balık türünün, kurutma işleminde uygulanan sıcaklığın, kas liflerinin yönünün, yağ içeriğinin ve balık derisinin olup olmaması gibi faktörlerin kurutma kinetiğini etkilediğini bildirmiştir.

Kontrol örneklerinde 40°C’de yapılan kurutma işlemi esnasında ortalama nem D_{eff} değeri $4,98 \times 10^{-10}$ m²/s olarak belirlenmişken, ultrason uygulanmış örneklerde bu değer ortalama $5,21 \times 10^{-10}$ m²/s olarak tespit edilmiştir. Böylece bir ön işlem olarak ultrason uygulanmasının ortalama D_{eff} değerini yaklaşık $0,23 \times 10^{-10}$ m²/s artırarak kontrol grubuna göre %4,5 oranında bir iyileşme sağladığı görülmüştür. Kurutma sıcaklığının 50°C olarak uygulandığı muamelelerde kontrol grubundaki nem D_{eff} değeri ortalama $5,73 \times 10^{-10}$ m²/s

olarak, ultrason uygulanan grupta ise ortalama $5,97 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak tespit edilmiştir. Böylece D_{eff} değerinde ultrason uygulanan örneklerde kontrole göre %4,2 oranında bir artış olduğu görülmüştür. Bununla birlikte 60°C 'de uygulanan kurutma işleminde kontrol örneklerinde $5,94 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak belirlenen ortalama D_{eff} değeri ultrason ön işlemi uygulanan örneklerde $6,405 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak bulunmuştur. Bu durum ultrason uygulanmasının nem D_{eff} değerinde yaklaşık olarak %7,8'lik bir artışa yol açtığını göstermektedir. Böylece daha yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen kurutma işleminde ultrason uygulamasının nem difüzyonu üzerinde daha etkili olduğunu söyleyebilmek mümkündür.

Kontrol ve ultrason uygulanmış örneklerde sıcaklığa bağlı olarak nem D_{eff} değerlerinde meydana gelen değişim Şekil 12'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere hem kontrol hem de ultrasonla muamele edilmiş örneklerde D_{eff} değeri, kurutma sıcaklığıyla birlikte artış göstermektedir. Bu durum moleküler difüzyonun Arrhenius tipi hızlanmasını yansıtmaktadır. Diğer yandan ultrason ön işlemi, tüm sıcaklıklarda daha yüksek D_{eff} değerlerinin elde edilmesine yol açmıştır. Bu bağlamda ultrasonun neden olduğu kavitasyon ve mikrokanal oluşumunun, özellikle daha yüksek kurutma sıcaklıklarında, nemin serbest bırakılmasını kolaylaştırarak ve nem difüzyonunu artırarak nem D_{eff} değerini artırdığını söylemek mümkündür. Elde edilen veriler, ultrasonun ön işlem olarak kurutma uygulamalarına entegre edilmesinin endüstriyel su ürünlerinde kurutma sürelerini önemli ölçüde kısaltabileceğini ve süreç verimliliğini artırabileceğini göstermektedir.



Şekil 12. Sıcaklığa bağlı olarak nem D_{eff} değerlerinde meydana gelen değişim

Aktivasyon enerjisi

Araştırmada elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri kontrol grubu örneklerinde 6,46 ve 8,94 kJ/mol olarak tespit edilmişken ultrason uygulanmış örneklerde 8,08 ve 9,99 kJ/mol olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin, balık kurutma süreçleriyle ilgili literatürde yer alan birçok çalışmada bildirilen değerlere göre kısmen daha düşük olduğu görülmüştür. Rana *et al.* (2025) tarafından yapılan bir çalışmada farklı yöntemlerle kurutulan yılan balığında (*Monopterus albus*) aktivasyon enerjisi değerleri bu çalışmadakine benzer şekilde 8–25 kJ/mol olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte gıda materyallerinin kurutulmasında genel olarak 12,7–110 kJ/mol aralığında E_a değerleri bildirilmektedir. Bu çalışmada elde edilen daha düşük E_a değerleri, balık dokusunun kurutma sırasındaki nispeten düşük sıcaklık duyarlılığına işaret etmekte, başka bir deyişle difüzyon bariyerinin daha kolay aşıldığını göstermektedir. Bu durumu, ince kesilmiş balık filetosunda su difüzyonunun kolay gerçekleşmesi ve kuruma hızının sıcaklıktan daha az etkilenmesiyle açıklamak mümkündür. Bununla birlikte ultrason işlemi, aktivasyon enerjisi üzerinde sınırlı bir etki oluşturmuştur. Elde edilen veriler, balık etinin uygun koşullarda düşük termal enerjiyle kurutulabilmesinin mümkün olduğunu ve bunun da enerji tasarrufu ve ürün kalitesi açısından olumlu etkiler doğuracağı söylenebilir.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Araştırma, ultrason ön işleminin Atlantik palamudu (*Sarda sarda*) etinde kurutma kinetikleri ile nem difüzyonu ve aktivasyon enerjisine etkisinin belirlenmesi amacıyla kurulmuş ve yürütülmüştür. Çalışmada, farklı sıcaklıklarda (40°C, 50°C, 60°C) sıcak hava ile yapılan kurutma işlemlerinde, kurutma verilerinin ince tabaka kurutma modelleriyle uyumu belirlenmiş ve difüzyon kat sayısı değerleri ile aktivasyon enerjileri tespit edilmiştir. Yapılan analizler ve değerlendirmeler neticesinde aşağıda belirtilen genel sonuç ve önerilere ulaşılmıştır.

1. Atlantik palamudu filetolarında hem sıcaklık artışının hem de ultrason ön işleminin kurutma hızını belirgin biçimde artırdığı görülmüştür.
2. Kontrol grubunda Midilli modeli tüm sıcaklıklarda en iyi uyumu sağlarken ($R^2 \geq 0,9973$; $RMSE \leq 0,0148$), ultrason uygulanmış numunelerde 40°C ve 60°C’de Midilli modeli yine en iyi uyumu gösteren model olarak bulunmuştur ($R^2 \geq 0,9990$). Bununla birlikte ultrason uygulanmış örneklerde 50°C’de Two-Term Exponential modeli daha iyi performansı göstermiştir ($R^2 = 0,9998$; $RMSE = 0,0044$). Newton ve Henderson-Pabis modelleri ise diğer modellere göre kurutma verilerine daha düşük uyum sağlamıştır. Bu sonuçlar, ultrason uygulaması ile kurutma sıcaklığının kütle transfer mekanizması üzerinde etkili olarak model uyumluluğunu etkilediğini göstermektedir.
3. Nem D_{eff} değerleri kontrol örneklerinde $4,85 \times 10^{-10} - 5,95 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ arasında bulunmuşken ultrason ön işlemi uygulanmış örneklerde $5,10 \times 10^{-10} - 6,41 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ arasında belirlenmiştir.
4. Ultrason işlemi, farklı kurutma sıcaklıklarında nem D_{eff} değerini %4 ile %8 arasında artırmıştır. Özellikle ilk 10 saatlik kurutma süresinde nem difüzyonun daha yüksek oranda gerçekleştiği görülmüştür. Bu durum ultrason uygulamasının toplam kurutma süresinde kısaltmaya yol açabilecek bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.
5. Nem D_{eff} değeri tüm örneklerde kurutma sıcaklığına bağlı olarak artış göstermiştir. Ultrason işlemi uygulanmış örneklerde tüm sıcaklıklarda daha yüksek nem D_{eff} değerleri tespit edilmiştir.
6. Kontrol örneklerinde $6,46 - 8,94 \text{ kJ/mol}$ arasında belirlenen E_a değeri, ultrason uygulanmış örneklerde $8,08 - 9,99 \text{ kJ/mol}$ arasında bulunmuştur. Bu düşük E_a

değerleri, palamut örneklerinde sıcaklık artışına bağlı olarak düşük enerji gereksinimiyle difüzyon gerçekleştiğini göstermektedir.

Bu sonuçlar, Atlantik palamudunun kurutulmasında ultrasonun ekonomik ve teknik açıdan uygulanabilir bir ön işlem olduğunu göstermektedir. 60°C sıcaklıkta ve ultrason ön işlemi uygulandığında en yüksek difüzyon katsayısı tespit edilmiştir. Model uyumluluğu açısından genel itibarıyla Midilli modelinin daha iyi performans gösterdiği, bununla birlikte ultrason uygulanmış örneklerde 50°C’de yapılan kurutma işlemi için Two-Term Exponential modelinin de dikkate alınması gerektiği gözlenmiştir. Yağlı balıkların endüstriyel kurutma tasarımıda sıcaklık ve ultrason kombinasyonları seçilirken tür ve spesifik işlem koşullarının dikkate alınması gerektiği, bu kapsamda palamut balığının kurutulmasında ultrason uygulamasının etkinliğini optimize etmek amacıyla farklı işlem şartlarının kullanıldığı yeni çalışmalara da ihtiyaç olduğu sonucuna varılmıştır.

KAYNAKÇA

- Adekanye, T., Alhassan, E., Amodu, M., Olanrewaju, T., & Iyanda, M. (2025). Kinetics of heat and mass transfer in moringa leaves drying in a cabinet dryer. *Results in Engineering*, 26, 104763.
- Adeyeye, S. A. O. (2019). An overview of fish drying kinetics. *Nutrition & Food Science*, 49(5), 886-902.
- Akpan, G. E., Aregbesola, O. A., & Olagunju, T. M. (2024). Analysis of drying kinetics and energy consumption of brine pretreated freshwater prawn fillets. *Journal of Food Process Engineering*, 47(7), e14683.
- Altan, C. O., Köstekli, B., Çorapçı, B., İpar, M. S., Kocatepe, D., & Turan, H. (2022). The sensory characteristics, nutritional profile and physical changes of the Atlantic bonito (*Sarda sarda* Bloch, 1793) gravlax: Effect of dill (*Anethum graveolens*) and garden cress (*Lepidium sativum*). *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 28, 100490.
- Álvarez, S., Álvarez, C., Hamill, R., Mullen, A. M., & O'Neill, E. (2021). Drying dynamics of meat highlighting areas of relevance to dry-aging of beef. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(6), 5370-5392.
- Anonymous. Health Benefits of Fish. Washington State Department Of Health., <https://doh.wa.gov/community-and-environment/food/fish/health-benefits>. (2 Eylül 2023).
- AOAC 2005. "Chapter 39. Meat and meat products". Official methods of analysis. Editor: Horwitz, W., Gaithersburg, MD: Association of Official Analytical Chemists.
- Aregbesola, O. A., Olagunju, T. M., & Akpan, G. E. (2022). Mutual and adverse interplay of pretreatments on drying characteristics of taro slices. *JSFA Reports*, 2(2), 48-63.
- Bantle, M., & Hanssler, J., 2013. Ultrasonic convective drying kinetics of clipfish during the initial drying period. *Drying Technology*, 31(11), 1307-1316.
- Barforoosh, M. Y., Borghaee, A. M., Rafiee, S., Minaei, S., & Beheshti, B. (2024). Determining the effective diffusivity coefficient and activation energy in thin-layer drying of Haj Kazemi peach slices and modeling drying kinetics using ANFIS. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 19, 192-206.
- Başlar, M., Kılıçlı, M., & Yalınkılıç, B. (2015). Dehydration kinetics of salmon and trout fillets using ultrasonic vacuum drying as a novel technique. *Ultrasonics Sonochemistry*, 27, 495-502.
- Boziaris, I. S. (Ed.), 2014. *Seafood processing: Technology, quality and safety*. John Wiley & Sons, 512 p, Hoboken.
- Cao, F., Zhang, R., Tang, J., Li, F., & Jiao, Y. (2021). Radio frequency combined hot air (RF-HA) drying of tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) fillets: Drying kinetics and quality analysis. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 74, 102791.
- Cárcel, J. A., Garcia-Perez, J. V., Riera, E., & Mulet, A., 2011. Improvement of convective drying of carrot by applying power ultrasound—Influence of mass load density. *Drying Technology*, 29(2), 174-182.

- Chemat, F., & Khan, M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(4), 813-835.
- Chen, F., Zhang, M., Mujumdar, A. S., Jiang, H., & Wang, L., 2014. Production of crispy granules of fish: a comparative study of alternate drying techniques. *Drying Technology*, 32(12), 1512-1521.
- Choi, S., Puligundla, P., & Mok, C., 2016. Microbial decontamination of dried Alaska pollock shreds using corona discharge plasma jet: Effects on physicochemical and sensory characteristics. *Journal of Food Science*, 81(4), M952-M957.
- Crank, J., & Gupta, R. S. (1975). Isotherm migration method in two dimensions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18(9), 1101-1107.
- Darvishi, H., Azadbakht, M., Rezaeiasl, A., & Farhang, A. (2013). Drying characteristics of sardine fish dried with microwave heating. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 12(2), 121-127.
- De la Fuente-Blanco, S., De Sarabia, E. R. F., Acosta-Aparicio, V. M., Blanco-Blanco, A., & Gallego-Juárez, J. A., 2006. Food drying process by power ultrasound. *Ultrasonics*, 44, e523-e527.
- Desrosier, N.W., Singh, R.P. (2025, March 24). food preservation. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/topic/food-preservation>
- Ellerby, D. J., Altringham, J. D., Williams, T., & Block, B. A. (2000). Slow muscle function of Pacific bonito (*Sarda chiliensis*) during steady swimming. *Journal of Experimental Biology*, 203(13), 2001-2013.
- Erbay, Z., & Icier, F. (2010). A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. *Critical reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 441-464.
- Erkan, N., Tunçelli, G. C., & Özden, Ö. (2020). Effects of salt/sugar brine storage solutions on shelf life of the salted Atlantic bonito. *Aquatic Sciences and Engineering*, 35(4), 119-126.
- Fikry, M., Benjakul, S., Al-Ghamdi, S., Mittal, A., Sarifudin, A., Nilsuwan, K., & Dabbour, M. (2024). Influence of ultrasonic pretreatment on drying and thermodynamic characteristics of Asian seabass fish skin during air-frying process. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 18, 4147–4160. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02482-1>
- Fikry, M., Benjakul, S., Al-Ghamdi, S., Tagrida, M., & Prodpran, T. (2023). Evaluating kinetics of convection drying and microstructure characteristics of Asian seabass fish skin without and with ultrasound pretreatment. *Foods*, 12(16), 3024.
- Fitri, N., Chan, S. X. Y., Che Lah, N. H., Jam, F. A., Misnan, N. M., Kamal, N. & Abas, F. (2022). A comprehensive review on the processing of dried fish and the associated chemical and nutritional changes. *Foods*, 11(19), 2938.
- Gallart-Jornet, L., Barat, J. M., Rustad, T., Erikson, U., Escriche, I., & Fito, P., 2007. Influence of brine concentration on Atlantic salmon fillet salting. *Journal of Food Engineering*, 80(1), 267-275.
- Gallego-Juárez, J. A., Riera, E., De la Fuente Blanco, S., Rodríguez-Corral, G., Acosta-Aparicio, V. M., & Blanco, A., 2007. Application of high-power ultrasound for dehydration of vegetables: processes and devices. *Drying Technology*, 25(11), 1893-1901.
- Genç, Y., Dağtekin, M., Başçınar, N. S., & Tercan, E. (2025). Length-weight relationships, growth parameters, mortality and condition factor of Atlantic bonito (*Sarda sarda*) from

- the Southern Black Sea. Turkish Journal of Maritime and Marine Sciences, 11(1), 1-13.
- Golden, C. D., Koehn, J. Z., Shepon, A., Passarelli, S., Free, C. M., Viana, D. F. & Thilsted, S. H. (2021). Aquatic foods to nourish nations. *Nature*, 598(7880), 315-320.
- Gökalp, H.Y., Kaya, M., Tülek, Y., Zorba, Ö. 2010. “Et ve ürünlerinde kalite kontrolü ve laboratuvar uygulama kılavuzu”, Atatürk Üniversitesi Yayın No: 751, Ziraat Fakültesi Yayın No: 318, Ders Kitapları Serisi No: 63, Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Ofset Tesisi, Erzurum.
- Inyang, U. E., Oboh, I. O., & Etuk, B. R. (2018). Kinetic models for drying techniques—food materials. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 8(2), 27-48.
- Kınacıgil, T., 2017. İzmir Balıkçılığı. Kristal Reklam ve Matbaacılık Hizmetleri Gıda San. Tic. Ltd. Şti, 304 p, Türkiye.
- Komolafe, C. A., Oluwaleye, I. O., Adejumo, A. O. D., Waheed, M. A., & Kuye, S. I. (2018). Determination of moisture diffusivity and activation energy in the convective drying of fish. *International Journal of Heat and Technology*, 36(4), 1262-1267.
- Koral, S., Köse, S., & Tufan, B. (2010). The effect of storage temperature on the chemical and sensorial quality of hot smoked Atlantic bonito (*Sarda sarda*, Bloch, 1838) packed in aluminium foil.
- Kumar, G. P., Xavier, K. M., Nayak, B. B., Kumar, H. S., Venkateshwarlu, G., & Balange, A. K., 2017. Effect of different drying methods on the quality characteristics of *Pangasius hypophthalmus*. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(10), 184-195.
- MacManus Chinenye, N., Ogunlowo, A. S., & Olukunle, O. J. (2010). Cinética del Secado de Cocoa (*Theobroma cacao* L.). *Chilean journal of agricultural research*, 70(4), 633-639.
- Medina-Vivanco, M., Sobral, P. D. A., & Hubinger, M. D. (2002). Osmotic dehydration of tilapia fillets in limited volume of ternary solutions. *Chemical Engineering Journal*, 86(1-2), 199-205.
- Mujumdar, A. S., 2006. Handbook of industrial drying. CRC press, 1312 p, Boca Raton.
- Murali, S., Delfiya, D. A., Kumar, K. S., Kumar, L. R., Nilavan, S. E., Amulya, P. R. & Samuel, M. P. (2021). Mathematical modeling of drying kinetics and quality characteristics of shrimps dried under a solar-LPG hybrid dryer. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 30(5), 561-578.
- Nie, C. Z., Wang, L., Tian, H. H., Huang, X. H., & Qin, L. (2025). The flavor enhancement mechanism of ultrasound-assisted curing and UV-assisted drying in semi-dried tilapia fillets based on flavoromics, lipidomics, and metabolomics. *Food Chemistry*, 463, 141386.
- Nwakuba, N. R., Okafor, V. C., Abba, E. C., & Nwandikom, G. I. (2018). Thin-layer drying kinetics of fish in a hybrid solar-charcoal dryer. *Nigeria Agricultural Journal*, 49(1), 46-56.
- Onyenwigwe, D. I., Ndukwu, M. C., Igbojionu, D. O., Ugwu, E. C., Nwakuba, N. R., & Mbanaso, J. (2023). Mathematical modelling of drying kinetics, economic and environmental analysis of natural convection mix-mode solar and sun drying of pre-treated potato slices. *International Journal of Ambient Energy*, 44(1), 1721-1732.
- Ozuna, C., Álvarez-Arenas, T. G., Riera, E., Cárcel, J. A., & Garcia-Perez, J. V. (2014). Influence of material structure on air-borne ultrasonic application in drying. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21(3), 1235-1243.

- Ozyalcin, Z. O., & Kipcak, A. S. (2021). The effect of ultrasonic pre-treatment on the temperature controlled infrared drying of *Loligo vulgaris* and comparison with the microwave drying. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 21(3), 135-145.
- Özden, Ö. (2010). Micro, macro mineral and proximate composition of Atlantic bonito and horse mackerel: a monthly differentiation. *International Journal of Food Science and Technology*, 45(3), 578-586.
- Panagiotou, N. M., Krokida, M. K., Maroulis, Z. B., & Saravacos, G. D. (2004). Moisture diffusivity: literature data compilation for foodstuffs. *International Journal of Food Properties*, 7(2), 273-299.
- Pradhan, N., Shrestha, M. K., Rai, S., Jha, D. K., & Sah, S. K., 2018. Quality assessment of dried mrigal (*Cirrhinus mrigala*) chhari fish from different market outlets of Nepal. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 6(2), 463-471.
- Puligundla, P., Choi, S., & Mok, C., 2018. Microbial decontamination of Gwamegi (semi-dried pacific saury) using corona discharge plasma jet, including physicochemical and sensory evaluation. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 27(3), 274-283.
- Rana, M. M., Saeid, A., Shakil, M., & Munir, M. B. effects of drying methods on physicochemical, sensory, and rehydration kinetics of dried Mud Eel (*Monopterus Cuchia*).
- Rastogi, N. K. (2011). Opportunities and challenges in application of ultrasound in food processing. *Critical reviews in Food Science and Nutrition*, 51(8), 705-722.
- Saygun, F., 2019. Marine edilen palamut balığı (*Sarda sarda*)’nın dondurularak depolama boyunca lipid ve duyuşsal kalite parametrelerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ordu.
- Takenaka, S., Nakabayashi, R., Ogawa, C., Kimura, Y., Yokota, S., & Doi, M., 2020. Characterization of surface *Aspergillus* community involved in traditional fermentation and ripening of katsuobushi. *International Journal of Food Microbiology*, 327, 108654.
- Toujani, M., Hassini, L., Azzouz, S., & Belghith, A. (2013). Experimental study and mathematical modeling of silverside fish convective drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 37(5), 930-938.
- Wang, Y., Zhang, M., & Mujumdar, A. S. (2011). Convective drying kinetics and physical properties of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) fillets. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 20(4), 361-378.
- Wu, W., Li, H., Chen, Y., Luo, Y., Zeng, J., Huang, J., & Gao, T. (2024). Recent advances in drying processing technologies for aquatic products. *Processes*, 12(5), 942.
- Yao, Y., 2016. Enhancement of mass transfer by ultrasound: Application to adsorbent regeneration and food drying/dehydration. *Ultrasonics Sonochemistry*, 31, 512-531.
- Zarein, M., Samadi, S. H., & Ghobadian, B., 2015. Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 14(1), 41-47.
- Zhang, B. Y., Jin, Y. Z., & Cheng, Y. D. (2012). Microwave drying of tilapia fillets: kinetics and modeling. *Advanced Materials Research*, 396, 1306-1312.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Fereshteh BABAEİ KALAM
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
Email:	
Eğitim	
Lise:	
Lisans:	
Yüksek lisans:	
Doktora:	
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	