KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 29(3), 2026
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 29(3), 2026
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 19.03.2026
Kabul Tarihi : 23.06.2026

Received Date : 19.03.2026
Accepted Date : 23.06.2026

AĞIRLIK TABANLI KONTROL VE YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ MODELLEME KULLANILARAK TÜNEL TİPİ GIDA KURUTUCUSUNUN PERFORMANSININ ARTIRILMASI

PERFORMANCE ENHANCEMENT of A TUNNEL-TYPE FOOD DRYER USING WEIGHT-BASED CONTROL and AI-DRIVEN MODELING

Mehmet DAŞ [1*] (ORCID: 0000-0002-4143-9226)

[1] Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mehmet DAŞ, m.das@firat.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, tünel tipi bir gıda kurutucuda ürün ağırlığına duyarlı olarak çalışan bir kontrol sistemi geliştirilmiş ve bu sistemin kurutma performansına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deney sistemine yük hücresi tabanlı ağırlık geri besleme kontrolü sağlayan bir PLC sistemi entegre edilmiştir. Sistem, ürün ağırlığı belirli bir eşik değerin (100 gram) altına düştüğünde fan hızı veya rezistans gücünü artırarak kurutma koşullarını dinamik şekilde optimize edecek şekilde tasarlanmıştır. Bu kapsamda iki ayrı senaryo uygulanmıştır: Birinci senaryoda ürün ağırlığı 100 gramın altına düştüğünde hava hızı 1,2 m/s'den 2,5 m/s'ye çıkarılmış; ikinci senaryoda ise aynı koşulda kurutma sıcaklığı 30 °C'den 45 °C'ye yükseltilmiştir. Elde edilen deneysel veriler, ağırlık kontrollü sistemin klasik kurutma yöntemine kıyasla kuruma süresini yaklaşık senaryo tipine göre %30 ve %33 oranında kısalttığını ve hem nem oranı (MR) hem de konvektif ısı transfer katsayısı (hc) açısından daha verimli sonuçlar sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca, kurutma havası sıcaklığı (Ti) ve MR gibi parametrelerin tahmini için regresyon tabanlı yapay zekâ modelleri geliştirilmiş; bu modeller oldukça düşük hata değerleriyle (MR için RMSE = 0,0010) yüksek doğrulukla çalışmıştır. Sonuç olarak, bu çalışma ağırlık kontrollü kurutmanın kurutma süresi, proses verimliliği ve ısı-kütle transferi üzerindeki olumlu etkilerini ortaya koyarken, yapay zekâ destekli modellemenin de sürecin öngörülebilirliği açısından güçlü bir araç olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Tünel tipi kurutucu, ağırlık geri beslemeli kontrol, gıda kurutma, konvektif ısı transferi, yapay zekâ modelleme

ABSTRACT

In this study, a weight-responsive control system was developed for a tunnel-type food dryer, and its effects on drying performance were experimentally investigated. A PLC-based system with load-cell weight feedback was integrated into the experimental setup. The system dynamically optimizes drying conditions by increasing fan speed or resistance power when the product weight falls below a threshold of 100 g. Two scenarios were tested. In the first scenario, air velocity increased from 1.2 m/s to 2.5 m/s, while in the second scenario, the drying temperature increased from 30 °C to 45 °C once the threshold weight was reached. Experimental results showed that the weight-controlled system reduced drying time by approximately 30–33% compared to conventional drying. It also improved the reduction in moisture ratio (MR) and the convective heat transfer coefficient (hc). Furthermore, regression-based artificial intelligence models were developed to predict drying air temperature (Ti) and MR with high accuracy, achieving an RMSE of 0.0010 for MR. The results demonstrate that weight-controlled drying enhances efficiency and process predictability.

Keywords: Tunnel-type dryer, weight-feedback control, food drying, convective heat transfer, artificial intelligence modelling

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

GİRİŞ

Gıda muhafaza yöntemleri arasında en yaygın kullanılan uygulamalardan biri kurutmadır. Kurutma işleminin temel amacı, ürünün depolama sürecinde bozulmasını önleyerek dayanım süresini uzatmaktır. Bu amaç doğrultusunda, ürün bünyesindeki nem miktarı mikrobiyal faaliyetleri ve istenmeyen kimyasal reaksiyonları sınırlandıracak düzeye indirilmektedir. Nem içeriğinin azaltılması aynı zamanda ürünün tat, aroma ve besin değeri gibi kalite özelliklerinin korunmasına da katkı sağlamaktadır. Bunun yanında kurutma, ürün hacmini azaltarak taşıma ve depolama süreçlerinde daha yüksek verimlilik sunmaktadır (Guiné, 2008). Özellikle gelişmekte olan birçok ülkede yeterli depolama altyapısının bulunmaması, gıda ve tahıl ürünlerinin korunmasını güçleştirmektedir. Bu nedenle kurutma, raf ömrünü uzatan, kaliteyi koruyan ve depolama sırasında oluşabilecek kayıpları azaltan etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Çünkü bu işlem sırasında ürün yapısındaki suyun büyük bölümü uzaklaştırılmaktadır. Güvenli ve etkin bir kurutma işlemi için genellikle 45–60°C aralığında sıcak hava kullanımı gerekli görülmektedir (Belessiotis ve Delyannis, 2011).

Tünel tipi kurutucular üzerine literatürde çok sayıda araştırma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda özellikle hava hızı, kurutma havası sıcaklığı ve bağıl nem gibi parametrelerin kurutma performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Charmongkolpradit ve çalışma arkadaşları, mor mısırın kurutulmasında kapalı çevrimli bir tünel tipi kurutucu kullanmış ve farklı sıcaklık ile hava hızı koşullarında en uygun kurutma parametrelerini belirlemiştir (Charmongkolpradit vd., 2021). Zohrabi ve arkadaşları ise tünel tipindeki konvektif bir kurutucuda çıkış havası devridaimini kontrol edebilmek amacıyla sıcaklık temelli bir kontrol yaklaşımı geliştirmiştir. Araştırmacılar, kurutucu giriş ve çıkış sıcaklıklarına bağlı olarak üç farklı kontrol stratejisini incelemiş ve bu stratejilerin enerji performanslarını, kontrol uygulanmayan deney sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Deneyler, kavak talaşının 55 ve 70°C sıcaklıklarda ve 360 ile 450 m^3/h hacimsel debilerde kurutulmasıyla gerçekleştirilmiştir (Zohrabi vd., 2020). Bir diğer çalışmada Delfiya ve diğerleri, kızılötesi ısıtma destekli tünel tipi bir gıda kurutucusunda hamsi kurutmuş ve üç farklı ısıl güç ile ısıtıcı-ürün arasındaki üç ayrı mesafeyi dikkate alarak optimum çalışma koşullarını araştırmıştır. Sonuçlar, en uygun kurutma performansının 2000 W/m^2 ısıl güç ve 7,5 cm mesafe koşulunda elde edildiğini göstermiştir (Aniesrani Delfiya vd., 2022).

Otomatik Kontrol Sistemleri, entegre olduğu sistemi herhangi bir dış müdahalesi gerektirmeksizin istenilen değerlerde tutmayı amaçlayan sistemlerdir (Hamid vd., 2022). Konvansiyonel kurutma sistemlerinde otomatik kontrol ile yapılan çalışmalar incelendiğinde genellikle kurutma havası sıcaklık kontrolü uygulanmıştır. Demirpolat ve diğerleri, Arapgir reyhan yapraklarını kurutmak için oransal-integral-türevsel (PID) kontrol destekli, tepsili tünel tipi kurutma sistem kullanılmışlardır. Kurumayı etkileyen parametreleri izotermal ve izotermal olmayan koşullar altında araştırmışlardır. PID, sistemi sıcaklık geri beslemeli ile kontrol etmişlerdir. PID de yapılan deneylerde sisteminde en düşük verim izotermal proseste bulunmuştur (Demirpolat vd., 2022). Gradov vd. Konvektif tip kurutucuda kaplama kapakla sıcaklık kontrolü gerçekleştirmişlerdir. Optimum kurutma işlemini, kurutma ünitesinin odalarındaki hava sıcaklıklarını izleyen sensörlere bağlı olan damper kaplama kapaklarının açılma oranını manipüle eden PID kontrolörleri aracılığıyla dinamik olarak sağlamışlardır (Gradov vd., 2022). Aydoğmuş ve arkadaşları üzümlerin kuruma davranışı güneşte, gölgede, tepsili kurutucuda ve sıcaklık beslemeli PID destekli sistemde incelemişlerdir. Farklı yöntemlerle kurutulan üzümlerin ortalama enerji verimliliğini; izotermal PID sisteminde %53,4 oranında, İzotermal olmayan PID sisteminde %59,7 ve kontrolsüz tepsili kurutucuda ise %30,5 olarak bulmuşlardır (Aydoğmuş vd., 2022).

Son yıllarda kurutma sistemlerinde yalnızca sıcaklık veya hava hızı kontrolüne dayalı klasik yaklaşımlar yerine, sensör tabanlı geri besleme, çevrim içi nem tahmini, çoklu sensör füzyonu ve yapay zekâ destekli modelleme yaklaşımları giderek daha fazla kullanılmaktadır. Nitekim Zuo vd. (2025), düşük sıcaklıklı ısı pompalı çeltik kurutma sisteminde çevrim içi nem tahmini için yapay sinir ağı tabanlı bir model geliştirmiş ve yüksek tahmin doğruluğu elde etmiştir. Benzer şekilde Yang vd. (2024), yük sensörü, hava hızı sensörü ve sıcaklık sensöründen elde edilen verileri çoklu sensör füzyonu ve CNN modeliyle birleştirerek tarımsal ürünlerin kurutulmasında çevrim içi nem tespit sistemi önermiştir. El-Mesery vd. (2026) ise endüstriyel kızılötesi-konvektif konveyör kurutma sisteminde yapay zekâ ve istatistiksel analizleri birlikte kullanarak kurutma performansı ve enerji tüketiminin tahmin edilebildiğini göstermiştir. Bu çalışmalar, kurutma süreçlerinde sensör tabanlı izleme ve yapay zekâ destekli tahmin yaklaşımlarının proses kontrolü, enerji verimliliği ve kurutma performansının iyileştirilmesi açısından giderek daha önemli hale geldiğini ortaya koymaktadır. Ancak ürün ağırlığının doğrudan kontrol değişkeni olarak kullanıldığı ve bu kontrol stratejisinin yapay zekâ destekli modelleme ile birlikte değerlendirildiği çalışmalar sınırlıdır. Bu yönüyle

sunulan çalışma, ağırlık geri beslemeli kontrol ve regresyon tabanlı tahmin yaklaşımını birlikte ele alarak literatüre katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmada tünel tipi bir kurutucuda kurutulacak ürünün ağırlık değişimine göre kurutucu rezistans sıcaklık ve fan hava hızı değerini kontrol edebilen bir otomasyon geliştirilmiştir. Geliştirilen kontrol ile ürün kuruma süresi adına faydalı sonuçlar elde etmek için geliştirilen otomasyon ile elde edilen ürün kurutma sonuçları değerlendirilmiştir. Ayrıca makine öğrenmesi algoritması olan regresyon algoritmaları kullanılarak tünel tip kurutucu içerisindeki ürünün ısı ve kütle transferini belirtilen parametrelere göre ifade edebilen matematiksel eşitlikler elde edilmiştir.

Bu çalışmanın amacı tünel tipi bir gıda kurutucuda bulunan fan hızı ve rezistans güç değerlerini, kurutulan ürün ağırlık değişimine göre kontrol ederek bir kontrollü kurutma süreci tasarlanmıştır. Bu kontrol sayesinde klasik kurutma sürecine göre en az %30 daha hızlı kurutma işlemi gerçekleştirmek amaçlanmıştır. Ayrıca kurutma süresince ürünün nem ve konvektif ısı transfer katsayısı değerleri için yapay zekâ yöntemleri kullanılarak doğrusal denklemler elde edilmiştir. Bu denklemler sayesinde kurutucu giriş-çıkış sıcaklık, ağırlık değişimi ve ürün yüzey sıcaklık değerlerine bağlı olarak ürün kütle ve ısı transferi değerlerini ifade eden matematiksel denklemler elde edilmiştir. Elde edilen denklemlerin sonuçları ile deneysel sonuçlar arasında ortalama %8 hata değerine sahip modeller elde etmek bu çalışmanın bir diğer amacıdır.

MATERYAL VE METOT

Deneysel ve Hesaplama Prosedürü

Sunulan bu çalışmada, daha önce Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Laboratuvarı'nda bulunan mevcut bir tünel tipi kurutma sisteminin revizyonu yapılmıştır. Ürün kurutmada en önemli özellik olan kurutma havası hızı ve rezistans güç değerleri set edilen ürün ağırlık değerlerine göre kontrol edilmiştir. Yapılan deneylerde gözlemlenen ürün ağırlık değişim süreçlerine göre kurutma senaryoları belirlenmiş ve bu değerlere göre kontrol işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneyler için mevcut tünel tip kurutucusu Şekil-1 de verilmiştir.

Şekil-1'de 250 watt güçe bir sirkülasyon fanı (A), kurutucu giriş havası sıcaklık-nem değerini ölçen datalogger (B), yük hücresine (load_cell) sahip ağırlık geri besleme kontrolünün yapıldığı, fan ve rezistans güçlerini kontrol eden PLC ünitesi (C), program ara yüzü (D), ürün yüzey sıcaklığını ölçen PT100 datalogger (E), ürün ağırlığını ölçmek için yük hücresine bağlı taşıyıcı aparat (F), 500 watt güce sahip 2 adet rezistans (G), kurutma tepsisi (H), kurutucu çıkış sıcaklık-nem değerini ölçen datalogger gösterilmiştir (I) ve Uni-T 362 marka anemometre (J) gösterilmiştir. PLC sistem kullanılarak ağırlık geri beslemeli kontrol yapılmış ve başlangıçta 170 gr olan ürünlerin 100 gram altına düşen ağırlıkları sonucunda fan ve rezistansın güç değerleri ayarlanmıştır. Kontrol prosedüründe kullanılan 100 g eşik değeri, ön deneylerde gözlenen ürün kütle kaybı davranışına göre belirlenmiştir. Başlangıçta yaklaşık 170 g olan elma örneklerinde 100 g seviyesi, serbest nem uzaklaşmasının önemli ölçüde gerçekleştiği ve kurutma hızının azalmaya başladığı ara aşamayı temsil etmektedir. Bu aşamadan sonra ısı ve kütle transferini desteklemek amacıyla fan hızı veya kurutma havası sıcaklığı artırılmıştır. Bu nedenle 100 g eşik değeri, kurutma sürecinde kontrol prosesinin devreye girmesi için deneysel gözleme dayalı kritik bir kütle seviyesi olarak değerlendirilmiştir.

Şekil 1. Tünel Tipi Kurutucu Deney Seti

Şekil 2: PLC/Arayüz Ekranı

Tablo 1'de deneyler esnasında dakikalık olarak ölçülen parametreler ve birimleri verilmiştir. Bu parametreler ile veri setleri oluşturulmuştur. Hem sıcaklık hem hava hızı kontrol deneyleri için 2 farklı deney yapılmıştır. Deneylerde 10 mm kalınlığında oval kesilmiş elma dilimleri kullanılmıştır. Her bir kurutma senaryosu aynı deney koşulları altında üç kez tekrarlanmış ve sonuçların değerlendirilmesinde bu deneylerden elde edilen ortalama değerler esas alınmıştır. Benzer şekilde, kurutma deneylerinde tekrarlı ölçümlerin kullanılması ve ortalama değerlere dayalı değerlendirme yapılması, deneysel sonuçların güvenilirliğini ve istatistiksel karşılaştırılabilirliğini artıran yaygın bir yaklaşımdır (Dufera vd., 2021; Getahun vd., 2024). Bu yaklaşım, deneysel sonuçların tekrarlanabilirliğini artırmak ve tekil ölçüm etkilerini azaltmak amacıyla uygulanmıştır.

Şekil 2'de, kurutma sisteminin gerçek zamanlı izlenmesi ve denetlenmesi amacıyla geliştirilen PLC tabanlı kullanıcı arayüzü sunulmaktadır. Bu arayüz üzerinden kurutma bölmesi iç sıcaklığı ve ürün ağırlığı anlık olarak izlenebilmekte, sıcaklık ve ağırlık için tanımlanan set değerleri sisteme girilebilmekte ve fanın çalışma durumu eş zamanlı olarak kontrol edilebilmektedir. Ayrıca arayüzde yer alan veri kayıt modülü sayesinde, proses değişkenleri seçilen zaman aralığında otomatik olarak kaydedilerek deney sürecinin sürekli izlenmesi sağlanmıştır. Bu arayüz sayesinde, özellikle kurutma bölmesi iç sıcaklığının istenen çalışma aralığında tutulması, ürün kütlesindeki değişimin eş zamanlı takibi ve süreç kontrolünün tek merkezden gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Ölçülen Parametreler ve Birimleri

Ölçüm Parametresi	Birim
Kurutucu giriş sıcaklığı (Tg)	°C
Kurutucu çıkış sıcaklığı (Tç)	°C
Ürün yüzey sıcaklığı (Ty)	°C
Ürün ağırlık değişimi (W)	gram
Kurutucu giriş havası nemi (Hg)	%
Kurutucu çıkış havası nemi (Hç)	%

Kurutma deneyleri kapsamında ürüne ilişkin ısı ve kütle transferi analizleri gerçekleştirilmiştir. Kütle transferinin değerlendirilmesinde kullanılan nem oranı (MR), yaş baza göre nem içeriği (Myb) ve kuru baza göre nem içeriği (Mkb) değerleri sırasıyla Eşitlik (1)–(3) yardımıyla belirlenmiştir.

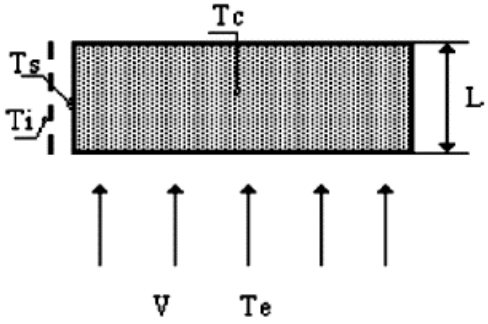
$$\%MC_{y.b} = \frac{W_s}{W_s+W_k} \cdot 100 \quad (1)$$

$$MC_{k.b} = \frac{W_s}{W_k} \quad (2)$$

$$MR = \frac{M-M_e}{M_o-M_e} \quad (3)$$

Kurutulan ürüne ait konvektif ısı transfer katsayısının (hc) belirlenmesinde, laminer akış koşulları için geçerli olan Pohlhausen bağıntısından yararlanılmıştır. Konvektif ısı geçişi, hareket halindeki bir akışkan ile katı bir yüzey arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanan enerji aktarımını ifade etmektedir. Bu çalışmada, düz bir plaka yüzeyi üzerinden gerçekleşen zorlanmış konveksiyon durumu ele alınmış ve buna bağlı ısı transfer davranışı incelenmiştir. Akışkanın viskoz etkileri nedeniyle, plaka yüzeyinde hızın sıfır kabul edildiği bir sınır şartı oluşmakta ve bu durum sınır tabakasının gelişmesine neden olmaktadır. Akış, başlangıçta laminer karakter göstermekte; ancak Reynolds sayısının kritik değerin üzerine çıkması halinde türbülanslı rejime geçiş mümkün olmaktadır (Simo-Tagne vd., 2019).

Elma örneği düz plaka olarak değerlendirilmiş, plaka sıcaklığının iç sıcaklık (Ti) değerinde sabit kaldığı ve plaka uzunluğunun, akışın türbülanslı rejime geçmesini engelleyecek kadar kısa olduğu varsayılmıştır. Elma yüzeyi üzerindeki zorlanmış akışa ilişkin konvektif ısı transfer mekanizması Şekil 3'te sunulmuştur.
Bu çalışmada elma dilimleri yaklaşık 10 mm kalınlığında ve geniş yüzey alanına sahip oval kesitli örnekler olarak hazırlanmıştır. Kurutma havasının ürün yüzeyi üzerinden geçmesi ve ısı-kütle transferinin ağırlıklı olarak geniş yüzeylerden gerçekleşmesi nedeniyle, hesaplamalarda elma dilimi düz plaka yaklaşımı ile değerlendirilmiştir (Daş vd., 2021). Bu kabul, konvektif ısı transfer katsayısının karşılaştırmalı olarak incelenmesi için pratik bir mühendislik yaklaşımı sunmaktadır. Bununla birlikte, ürün geometrisinin tam olarak ideal düz plaka formunda olmaması hc değerlerinde sınırlı sapmalara neden olabileceğinden, bu durum çalışmanın varsayımlarından biri olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3. Düz Bir Plaka Üzerinde Zorlanmış Akış İçin Konvektif Isı Transferi

Ortalama ısı transfer katsayısı, laminer akış için Pohllhausen Eşitliği (Eşitlik 4) ve aşağıda verilen (Velic, 2004) diğer Eşitlikler (Eşitlik 5-7) kullanarak hesaplanmıştır. (Çerçi ve Daş, 2019).

$$\mathrm{Nu}_{\mathrm{lam}} = 0.664\,\mathrm{Re}^{1/2}\,\mathrm{Pr}^{1/3} \qquad (\mathrm{Re} < 2\times10^{5}) \tag{4}$$

Deneysel koşullar altında hesaplanan Reynolds sayısı değerleri $1{,}04\times10^{4}$ ile $2{,}36\times10^{4}$ aralığında değişmiştir. Bu değerlerin tamamı kritik Reynolds sayısı olan 2×10^{5} değerinin altında kaldığından, elma yüzeyi üzerindeki zorlanmış taşınım hesabında laminer akış kabulü uygun görülmüştür.

$$\mathrm{Nu} = \frac{h_c L}{K_v} \tag{5}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{L\,V\,\rho_v}{\mu_v} \tag{6}$$

$$\mathrm{Pr} = \frac{\mu_v C_v}{K_v} \tag{7}$$

Reynolds (Re) ve Prandtl (Pr) sayılarının hesaplanabilmesi için nemli havaya ait yoğunluk (ρv), ısıl iletkenlik (Kv), özgül ısı (Cv) ve dinamik viskozite (μv) değerleri polinom türündeki bağıntılar yardımıyla belirlenmiştir. Nemli havanın bu termofiziksel özelliklerinin hesaplanmasında Eşitlik (8)–(12)'den yararlanılmıştır (Anwar ve Tiwari, 2001).

$$\rho_v = \frac{353.44}{T_i+273.15} \tag{8}$$

$$K_v = 0.0244 + 0.6773\times10^{-4}T_i \tag{9}$$

$$C_v = 999.2 + 0.1434T_i + 1.101\times10^{-4}T_i^2 - 6.7581\times10^{-8}T_i^3 \tag{10}$$

$$\mu_v = 1.718\times10^{-5} + 4.620\times10^{-8}T_i \tag{11}$$

$$T_i = \frac{T_s+T_e}{2} \tag{12}$$

Eşitlik (8-12)'de nemli havanın elde edilen fiziksel özellikleri için Ti, ortam sıcaklığı (Te) ve ürünün yüzey sıcaklığının (Ts) ortalaması olarak alınmaktadır.

Nemli havaya ait termofiziksel özellikler, ürün yüzey sıcaklığı ile ortam sıcaklığının ortalaması alınarak belirlenen film sıcaklığına bağlı olarak hesaplanmıştır. Bu kapsamda yoğunluk, özgül ısı, dinamik viskozite ve ısıl iletkenlik değerleri Eşitlik (8)–(12) kullanılarak elde edilmiştir. Deney koşulları altında hesaplanan yoğunluk değerleri yaklaşık 1,113–1,169 kg/m³, ısıl iletkenlik değerleri 0,02638–0,02741 W/m°C, özgül ısı değerleri 1003,49–1005,79 J/kg°C ve dinamik viskozite değerleri yaklaşık $1{,}86\times10^{-5}$–$1{,}93\times10^{-5}$ kg/ms aralığında değişmiştir. Hesaplanan bu termofiziksel özellikler Reynolds ve Prandtl sayılarının belirlenmesinde kullanılmış; ardından Eşitlik (4), (6) ve (7)'ye yerleştirilerek konvektif ısı transfer katsayısı (hc) hesaplanmıştır.

Yapay Zekâ Prosedürü

Makine öğrenmesi, hesaplamalı zekâ alanında en yaygın başvurulan yaklaşımlardan biridir. Bu yaklaşım, bilgisayar sistemlerinin verilerden örüntüler çıkararak öğrenmesini ve bu öğrenmeye dayalı olarak öngörüler üretmesini sağlayan yöntemlerin bütününü ifade eder. Söz konusu algoritmalar, mevcut örneklerden hareketle bir model kurar ve karar verme sürecini bu model üzerinden yürütür. Günümüzde veri miktarının çok büyük boyutlara ulaşması,

geleneksel ve manuel analiz yöntemlerini yetersiz bırakmaktadır. Bu nedenle, belirli bir probleme ilişkin ortamdan toplanan verilerin makine öğrenmesi teknikleriyle işlenmesi, etkili ve uygulanabilir çözümler elde etmede önemli bir yol olarak öne çıkmaktadır (Das ve Akpinar, 2018).

Basit Doğrusal Regresyon Modeli

Basit doğrusal regresyon (SLR) modelinde, iki değişken arasındaki ilişkiyi modeller. Bu modelleme sonucu tek bir değişkene dayalı Eşitlik 13'teki gibi basit doğrusal bir denklem üretebilir (Sreehari ve Pradeep Ghantasala, 2019).

$$Y = \alpha 0 + \alpha 1X + \varepsilon \quad (13)$$

Eşitlik 13 te ki;
Y=Yanıt Değişkeni (Bağımlı Değişken), X=Yordayıcı Değişken (Bağımsız Değişken), ε =Rastgele Değişken (Hata Terimi) ni ifade eder.
Eşitlik 13'de görünen doğrusallık sadece bir varsayımdır. Y'nin bağımsızlık dağılımı gibi bazı varsayımlar daha eklenebilir. Tahmin edilen model belirli bir X değerine göre Y değerini tahmin etmek için kullanılabilir.

Çoklu Doğrusal Regresyon Modeli

Çoklu doğrusal regresyonda (MLR) Y bağımlı değişkeni bazen birden fazla bağımsız değişkenden etkilenir. Y ile birkaç tahmin edici arasında ilişki kuran doğrusal bir model Eşitlik 14 ile ifade edilebilir (Mahaboob vd., 2020).

$$Y = \alpha 0 + \alpha 1X1 + \alpha 2X2 + ... + \alpha iXi + \varepsilon \quad (14)$$

Rastgele sabitler α'lara regresyon katsayıları denir. Y'deki yordayıcılar ile açıklanamayan rastgele varyasyon, alfa hata terimi ile sağlanır. Burada Y değerini tahmin etmek için birden çok değişken (X1,X2,…Xi) kullanılabilir.
Tünel tipi kurutucuda nem ve konvektif ısı transferi değerlerinin modellemesi için regresyon algoritmalarında kullanılan veri seti Tablo 2 de gösterilmiştir. Tabloda parametrelerin birimleri ve sembolleri verilmiştir.

Tablo 2. Regresyon Modellemeleri İçin Giriş v Çıkış Parametreleri

Giriş Parametreleri	
Parametre	**Birim**
Kurutucu Giriş Sıcaklığı (Tg)	°C
Kurutucu Çıkış Sıcaklığı (Tc)	°C
Kurutucu Giriş Nem (Hg)	%
Kurutucu Çıkış Nem (Hc)	%
Ürün Yüzey Sıcaklığı (Ty)	°C
Ürün Ağırlık	g
Çıkış Parametreleri	
Parametre	**Birim**
Ürün Boyutsuz Nem İçeriği (MR)	Boyutsuz
Kurutma havası sıcaklığı (Ti)	°C

Regresyon modellerinin geliştirilmesinde deneysel ölçümlerden elde edilen toplam 210 veri satırı kullanılmıştır. Veri setinde kurutucu giriş sıcaklığı (Tg), kurutucu çıkış sıcaklığı (Tç), kurutucu giriş nemi (Hg), kurutucu çıkış nemi (Hç), ürün yüzey sıcaklığı (Ty) ve ürün ağırlığı giriş parametreleri olarak tanımlanmıştır. Çıkış parametreleri ise boyutsuz nem oranı (MR) ve kurutma havası sıcaklığı (Ti) olarak belirlenmiştir. Veri setinin %70'i eğitim, %30'u test amacıyla ayrılmış; buna göre yaklaşık 147 veri eğitim, 63 veri test aşamasında kullanılmıştır.

Regresyon algoritmaları ile elde nem içeriği ve ısı transferi değerleri ile deneysel değerler arasında doğruluğu belirlemek için ortalama mutlak hata (MAE) analizi yapılmıştır. MAE analizi Eşitlik 15'te aşağıda verilmiştir (Alic vd., 2019).

$$MAE = \left(\left| \frac{X_{deneysel} - X_{tahminsel}}{X_{deneysel}} \right| \right) \quad (15)$$

Belirsizlik Analizi

Kurutma sisteminde yapılan deneylerde; sıcaklık, hava hızı, güç, nem ve ürün ağırlığı ölçümü sırasında ortaya çıkacak belirsizlikler için hem sabit hataların hem imalat hatalarının hem de rastgele hataların etkili olduğu tahmin edilmiştir. Bir parametrenin değeri ölçülürken sabit hatalar, rastgele hatalar ve üretim hatalarından kaynaklanan hatalar dikkate alınması gerekir. Bu ölçülen değerlerden kaynaklanan toplam hataların hesaplanması için Eşitlik 16 kullanılmıştır (Holman, 2012).

$$W_x = [(X_1)^2 + (X_2)^2 + \cdots \ldots \ldots (X_n)^2]^{1/2} \quad (16)$$

Deneysel çalışmalarda ölçüm cihazlarından kaynaklanan hatalar, hesaplanan performans parametrelerinin doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle çalışmada kullanılan temel ölçüm cihazlarına ait ölçüm aralıkları ve hassasiyet değerleri dikkate alınarak belirsizlik değerlendirmesi yapılmıştır. Sıcaklık, bağıl nem ve ürün ağırlığı ölçümlerine ait cihaz hassasiyetleri temel alınmış; ayrıca bu ölçümlerden türetilen boyutsuz nem oranı (MR) ve konvektif ısı transfer katsayısı (hc) için birleşik belirsizlik değerleri değerlendirilmiştir. Ölçüm ve hesaplama belirsizliklerine ait değerler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Ölçüm ve Hesaplama Belirsizlikleri

Ölçülen parametre	Cihaz	Ölçüm aralığı	Hassasiyet / doğruluk
Sıcaklık	PT100 / datalogger	-10°C – 200 °C	±0.5 °C
Nem	Nem sensörü / datalogger	5.5 – 99. %RH	±0.5%RH
Hava hızı	Uni-T 362 anemometre	0–30 m/s	±0,01 m/s
Ağırlık	Load-cell	1–1700 g	±0,1 g
Hesaplanan parametre		**Ortalama değer aralığı**	**Birleşik belirsizlik**
MR		0,12 - 1	±0,005
hc		11,16 – 16,28 W/m²°C	±0,025 W/m²°C

Tablo 3 incelendiğinde, hesaplanan parametreler açısından, boyutsuz nem oranı (MR) değerleri 0,12–1,00 aralığında değişmiş ve birleşik belirsizlik değeri ±0,005 olarak belirlenmiştir. MR belirsizliğinin düşük olması, bu parametrenin temel olarak ürün ağırlığındaki değişime bağlı olarak hesaplanmasından kaynaklanmaktadır. Buna karşılık, konvektif ısı transfer katsayısı (hc) sıcaklık, nemli hava özellikleri ve akış koşullarına bağlı olarak hesaplandığından daha yüksek bir belirsizlik değerine sahiptir. Bu kapsamda hc değerleri 11,16–16,28 W/m²°C aralığında elde edilmiş ve birleşik belirsizlik değeri ±0,025 W/m²°C olarak değerlendirilmiştir. Bu sonuçlar, deneysel verilerden türetilen MR ve hc parametrelerinin makul belirsizlik sınırları içerisinde hesaplandığını göstermektedir.

Eşitlik (8)–(12) yardımıyla hesaplanan nemli havaya ait termofiziksel özelliklerin deney koşullarındaki değer aralıkları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Deney Koşullarında Hesaplanan Nemli Hava Termofiziksel Özellikleri

Özellik	Sembol	Değer aralığı	Birim
Yoğunluk	ρv	1,113 – 1,169	kg/m³
Isıl iletkenlik	Kv	0,02638 – 0,02741	W/m°C
Özgül ısı	Cv	1003,49 – 1005,79	J/kg°C
Dinamik viskozite	μv	$1{,}86\times10^{-5}$ – $1{,}93\times10^{-5}$	kg/ms

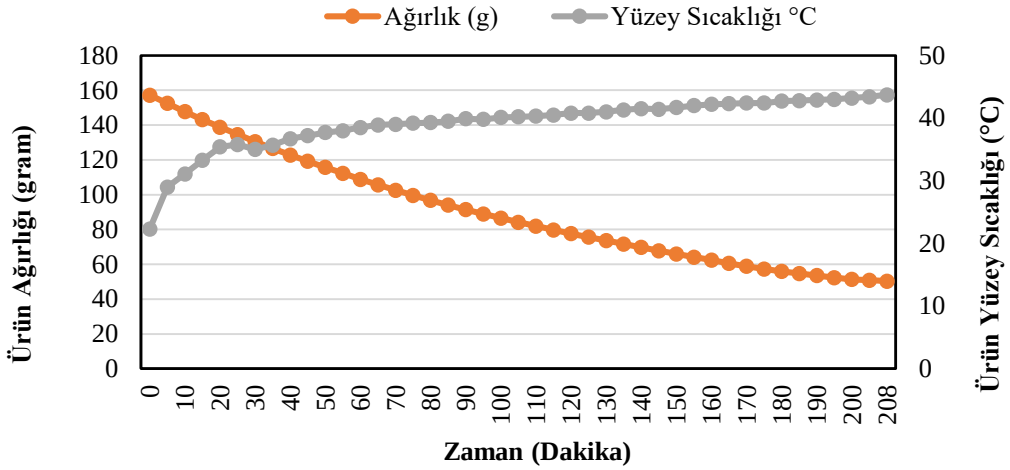
BULGULAR

Bu bölümde, tünel tipi kurutucuda 2 farklı kurutma senaryosu belirlenmiştir. Birinci senaryoda ürün ağırlığı 100 gramın altında düştüğünde fan devri değiştirilerek kurutucu hava hızı 1,2 m/s den 2,5 m/s ye çıkartılmış ve ürün kuruma parametreleri incelenmiştir. Aynı şekilde ikinci senaryoda ise ürün ağırlığı 100 gram altına düştüğünde rezistans gücü değiştirilerek kurutma havası sıcaklığı 30 °C den 45 °C ye çıkartılmış ve kurutma parametreleri incelenmiştir.

Birinci Kurutma Senaryosu

Birinci kurutma senaryosunda kurutma havası 45 °C ve hava hızı 1,2 m/s deney şartlarında kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4 ve 5'te ağırlık kontrolü yapılmadan klasik kurutma deneyleri esnasında sırası ile ürün ağırlık-yüzey sıcaklığı değişimleri ve nem oranı (MR) ve ısı transferi (hc) değişimleri verilmiştir.

Şekil 4'te ağırlık kontrolü yapılmadan klasik kurutma koşullarında (hava sıcaklığı 45 °C ve hava hızı 1,2 m/s) ürün ağırlığı ve yüzey sıcaklığının zamana göre değişimi gösterilmiştir. Kurutma süresi boyunca ürün ağırlığında düzenli bir azalma gözlenmiş olup bu, nemin buharlaşarak üründen uzaklaştığını göstermektedir. Ürün yüzey sıcaklığı ise zamanla artış göstermiş, bu da ürünün giderek daha kuru hale geldiğini ve ısı enerjisinin artık daha çok sıcaklık artışına dönüştüğünü ortaya koymuştur. Ancak hava hızı sabit tutulduğu için bu sıcaklık artışı görece yavaş bir kurutma sürecini yansıtmaktadır.

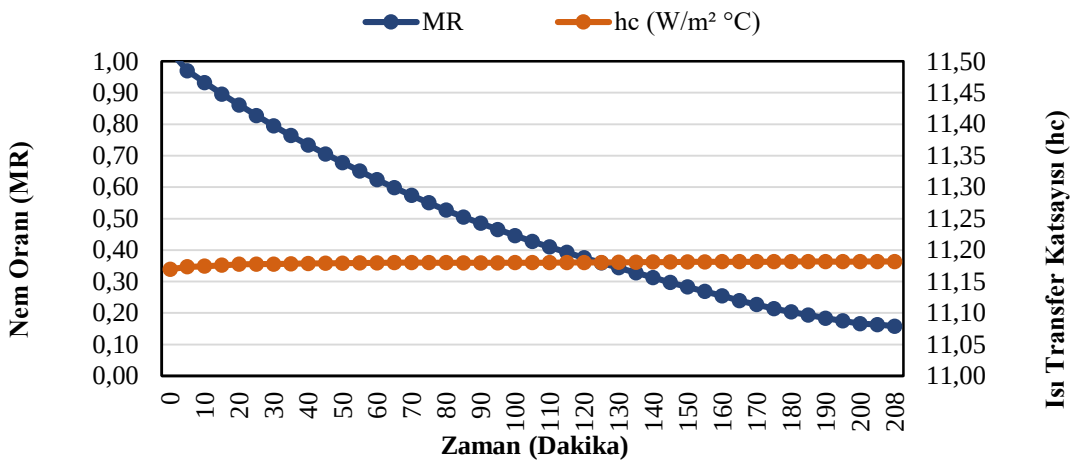


Şekil 4. Ürün Ağırlığı ve Ürün Yüzey Sıcaklık Değerlerinin Zamana Göre Değişimi

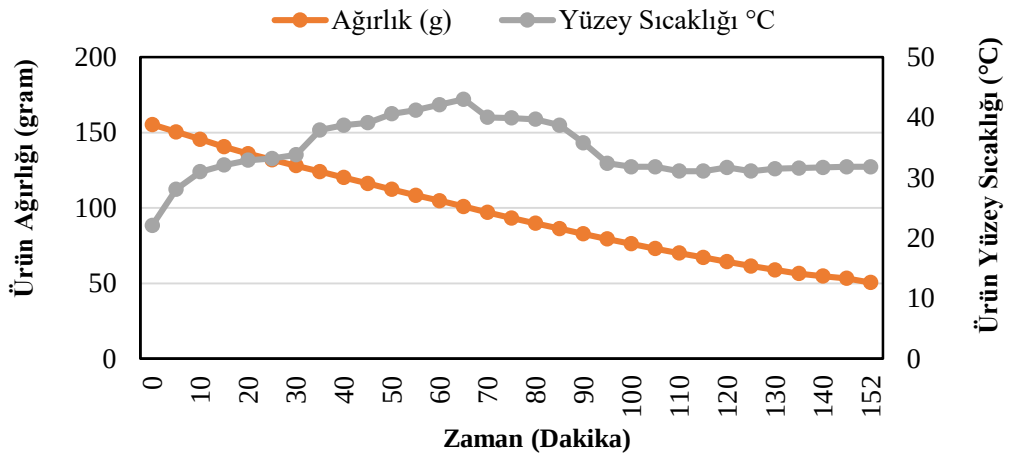
Şekil 5, yine klasik kurutma koşullarında elde edilen boyutsuz nem oranı (MR) ve konvektif ısı transfer katsayısı (hc) değişimlerini göstermektedir. MR değeri zamanla belirgin şekilde azalarak kurutma işleminin başarılı şekilde sürdüğünü doğrulamaktadır. Isı transfer katsayısı hc ise başlangıçta daha düşük değerlerde seyretmiş, zamanla yüzeydeki nemin azalmasıyla birlikte artış göstermiştir. Bu durum, ürün yüzeyinden ısı transferinin başlangıçta nemin buharlaşmasıyla sınırlandığını ancak kuruma ilerledikçe ısıl iletkenliğin arttığını göstermektedir.

Şekil 6'da, ürün ağırlığı 100 gramın altına düştüğünde hava hızının 1,2 m/s'den 2,5 m/s'ye yükseltildiği durumda ürün ağırlığı ve yüzey sıcaklığının zamana göre değişimi verilmiştir. Hava hızındaki artışın etkisiyle ürün ağırlığında çok daha hızlı bir azalma meydana gelmiş, bu da kurutma hızında belirgin bir artışı göstermiştir. Aynı zamanda ürün yüzey sıcaklığı daha kısa sürede yükselmiş ve bu yükseliş daha dengeli bir seyir izlemiştir. Bu durum, fan hızındaki artışla birlikte kurutma havasının ürünle daha etkin temas ettiğini ve enerji transferinin daha verimli gerçekleştiğini ortaya koymaktadır.

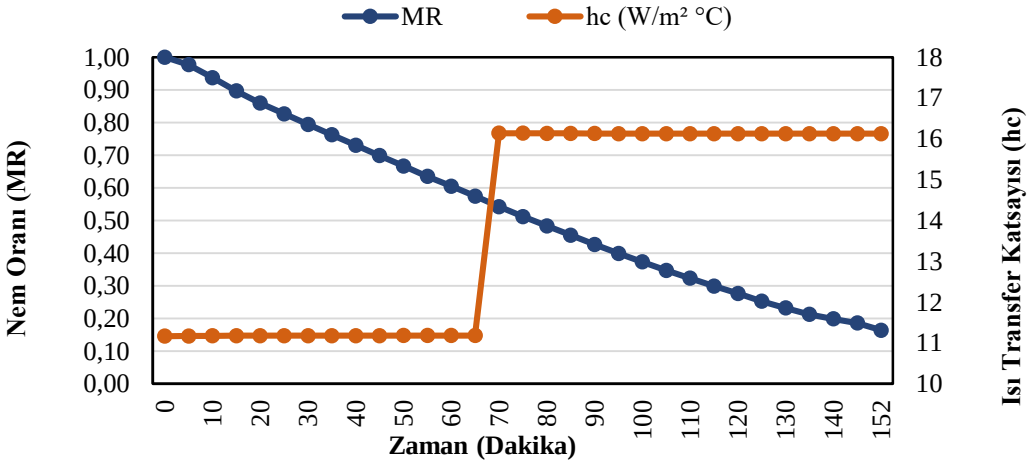
Şekil 7, hava hızı artırıldıktan sonra elde edilen MR ve hc değişimlerini sunmaktadır. MR değeri klasik kurutmaya kıyasla daha hızlı bir şekilde düşmüş, bu da nemin ürün yüzeyinden daha hızlı uzaklaştırıldığını göstermektedir. Ayrıca hc değerlerinde de anlamlı bir artış görülmüş, bu durum ürün ile hava arasındaki ısı transferinin daha etkin hale geldiğini işaret etmektedir. Hava hızının yükseltilmesiyle oluşan bu değişim, hem nem gideriminin hem de ısı transferinin hızlanmasına ve sonuç olarak kurutma süresinin önemli ölçüde azalmasına katkı sağlamıştır.



Şekil 5. MR ve hc Değerlerinin Zamana Göre Değişimi



Şekil 6. Hava Hızı Kontrolü ile Ürün Ağırlığı ve Ürün Yüzey Sıcaklık Değerlerinin Zamana Göre Değişimi

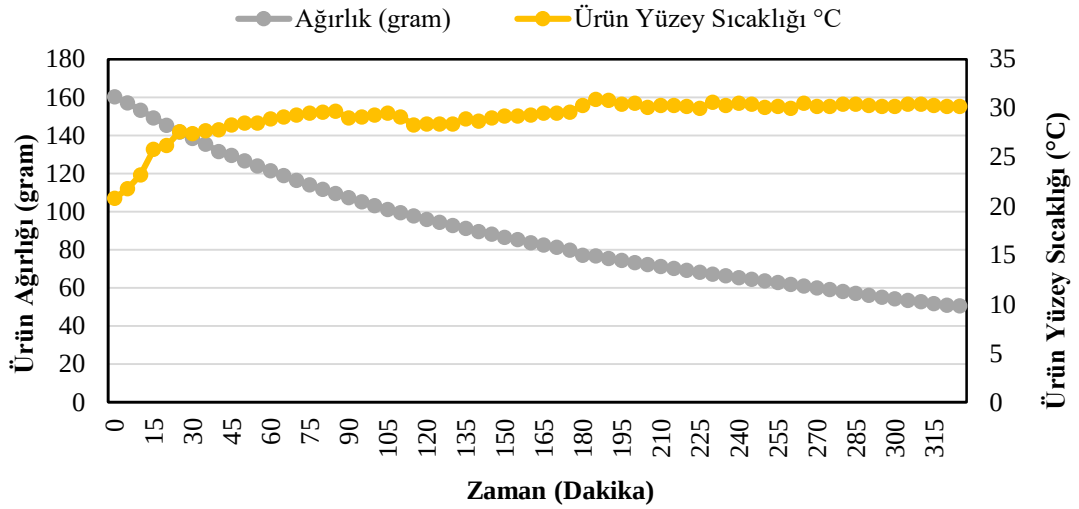


Şekil 7. Hava Hızı Kontrolü ile MR ve hc Değerlerinin Zamana Göre Değişimi

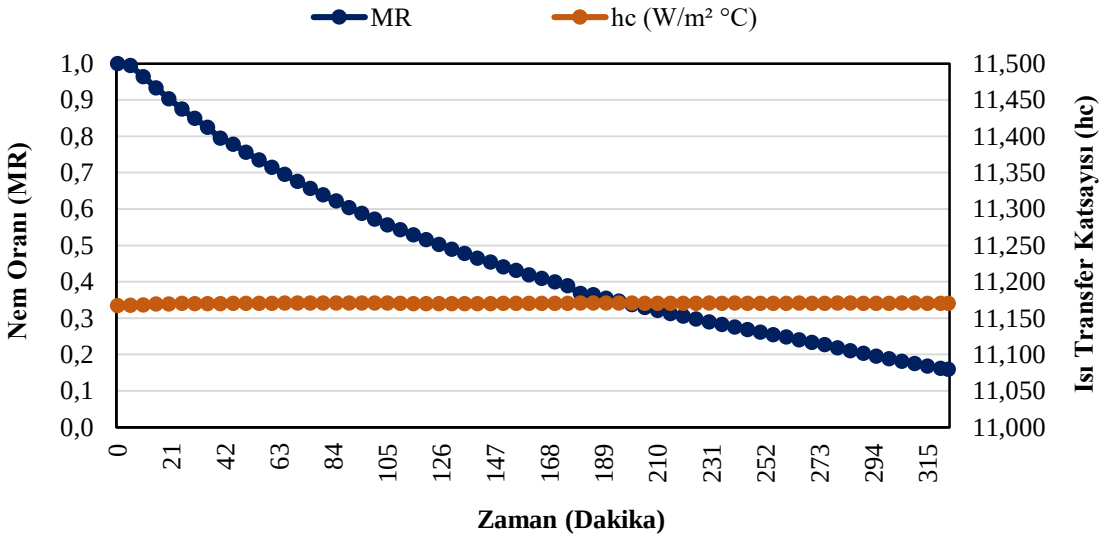
İkinci Kurutma Senaryosu

İkinci kurutma senaryosunda kurutma havası 30 °C ve hava hızı 1,2 m/s deney şartlarında kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 8 ve 9 de ağırlık kontrolü yapılmadan klasik kurutma deneyleri esnasında sırası ile ürün ağırlık-yüzey sıcaklığı değişimleri ve nem oranı (MR) ve ısı transferi (hc) değişimleri verilmiştir.

Şekil 8'de, sıcaklık kontrolü uygulanmadan, başlangıçta 30 °C sıcaklık ve 1,2 m/s hava hızı ile gerçekleştirilen klasik kurutma deneyinde, ürün ağırlığının yaklaşık 170 gramdan 48 gram seviyesine düşmesi yaklaşık 320 dakika sürmüştür. Bu süreçte ürün yüzey sıcaklığı ise 22 °C'den başlayarak yaklaşık 30 °C'ye kadar yavaş bir artış göstermiştir. Düşük sıcaklık nedeniyle ısı aktarımı sınırlı kalmış ve bu da hem ağırlık kaybının hem de yüzey sıcaklığı artışının yavaş seyretmesine neden olmuştur.



Şekil 8. Ürün Ağırlığı ve Ürün Yüzey Sıcaklık Değerlerinin Zamana Göre Değişimi



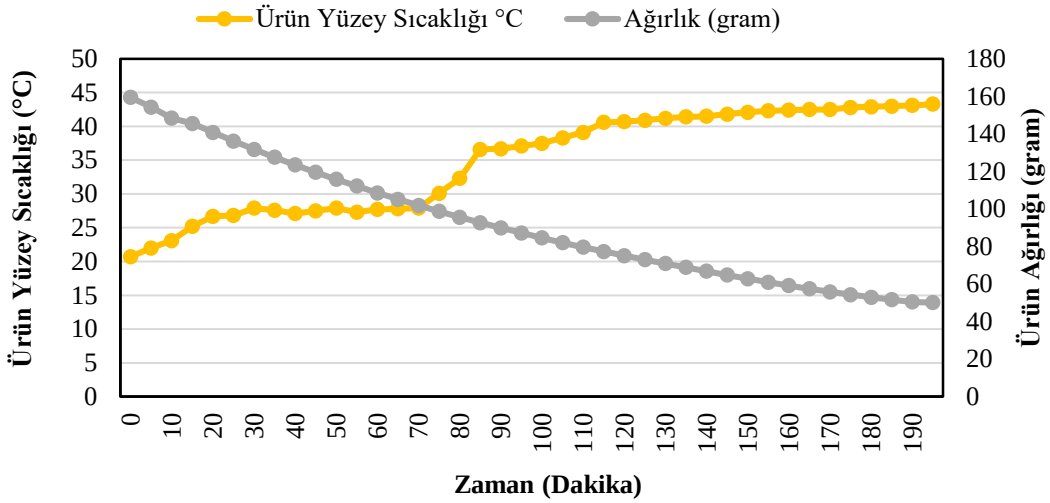
Şekil 9. MR ve hc Değerlerinin Zamana Göre Değişimi

Bu kurutma senaryosunda daha sonra ürün ağırlığı 100 gramın altına düştüğünde kurutma havası sıcaklığı 45 °C ye çıkartılmış ve aynı şekilde Şekil 10 ve Şekil 11 elde edilmiştir.

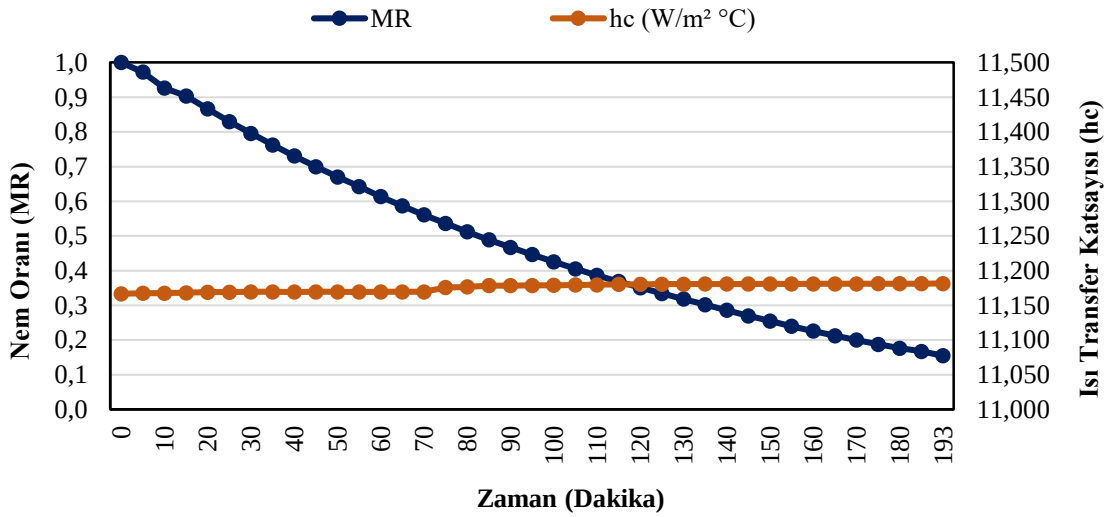
Şekil 10'da ürün ağırlığı 100 gramın altına düştüğünde sıcaklık 30 °C'den 45 °C'ye çıkarılarak yapılan kontrol uygulamasında, ürün ağırlığı yaklaşık 100 gramdan 48 grama yalnızca 90 dakikada düşmüştür. Yüzey sıcaklığı da bu süreçte daha hızlı artarak 30 °C'den 44 °C'ye kadar ulaşmıştır. Önceki deneye göre hem ağırlık kaybı hem de sıcaklık yükselişi daha hızlı gerçekleşmiş, bu da sıcaklık artışının kurutma sürecini önemli ölçüde hızlandırdığını göstermektedir.

Şekil 11 incelendiğinde, sıcaklık kontrolü uygulanan senaryoda, MR değeri yaklaşık 0,99'dan 0,12'ye sadece 200 dakikada düşmüş, bu da klasik yönteme göre kurutma süresinde yaklaşık %33'lük bir kısalma sağlandığını göstermektedir. hc değeri ise başlangıçta 11,16 W/m²°C iken, sıcaklık artışıyla birlikte maksimum 11,18 W/m²°C'ye

ulaşmıştır. Bu durum, yüksek sıcaklıkta ısı transfer katsayısının artışını sağlayarak kurutma etkinliğini belirgin şekilde artırdığını göstermektedir.



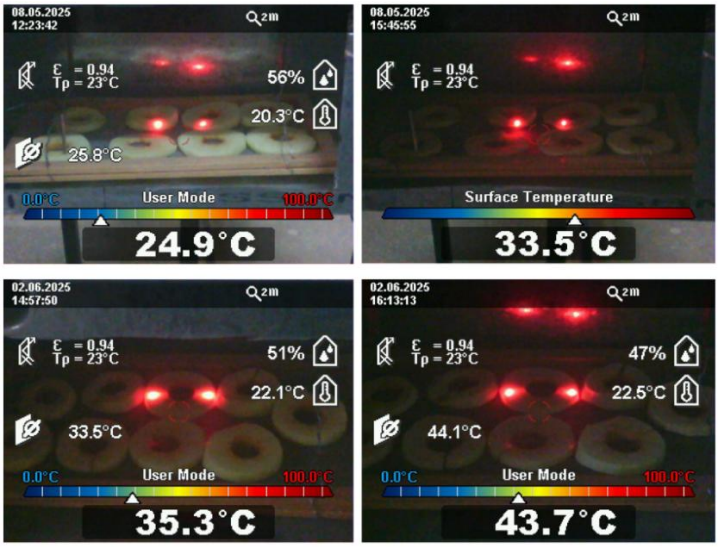
Şekil 10. Sıcaklık Kontrolü ile Ürün Ağırlığı ve Ürün Yüzey Sıcaklık Değerlerinin Zamana Göre Değişimi



Şekil 11. Sıcaklık Kontrolü ile MR ve hc Değerlerinin Zamana Göre Değişimi

Her iki yöntem ile elde edilen MR eğrilerinin zamana bağlı olarak azalan karakter göstermesi, konvektif kurutma literatüründe bildirilen genel kurutma davranışı ile uyumludur. Benzer şekilde, kurutmanın ilerleyen aşamalarında ürün yüzeyindeki nemin azalmasına bağlı olarak hc değerlerinde gözlenen değişim, zorlanmış taşınım koşullarında beklenen ısı transfer eğilimiyle örtüşmektedir. Bu sonuçlar, ağırlık kontrollü kurutma uygulamasının yalnızca deneysel olarak değil, literatürde bildirilen kurutma kinetiği davranışları açısından da tutarlı olduğunu göstermektedir (Das vd., 2021, Muthuvairavan ve Natarajan, 2023).

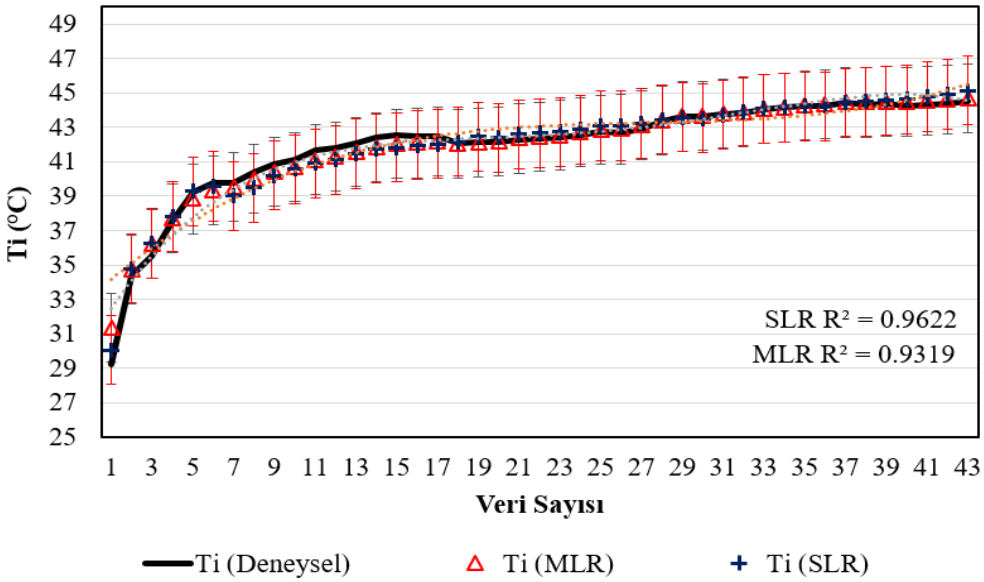
Şekil 12'de, ağırlık geri beslemeli kontrol stratejisinin iki farklı senaryodaki uygulama anı görsel olarak sunulmaktadır. Şeklin üst kısmında, ürün ağırlığı 100 g eşik değerinin altına düştüğünde fan devrinin artırılmasına bağlı olarak hava hızı kontrolünün devreye girdiği durum; alt kısmında ise aynı ağırlık eşiğinin altında rezistans gücünün artırılmasıyla kurutma havası sıcaklığının yükseltildiği sıcaklık kontrol senaryosu gösterilmektedir. Bu görseller, kontrol algoritmasının ürün kütlesindeki azalmayı esas alarak kurutma koşullarını dinamik biçimde değiştirdiğini doğrulamaktadır. Hava hızı kontrolünde zorlanmış taşınım etkisinin artırılması, sıcaklık kontrolünde ise kurutma potansiyelinin yükseltilmesi hedeflenmiştir. Böylece her iki yaklaşımda da, ürün kritik ağırlık seviyesine ulaştıktan sonra ısı ve kütle transfer mekanizmaları güçlendirilerek kurutma süresinin kısaltılması ve proses veriminin artırılması amaçlanmıştır.



Şekil 12. Ağırlık Geri Beslemeli Kontrol Senaryolarında IR Termometre ile Ürün Yüzey Sıcaklık Ölçümleri

Yapay Zekâ Bulguları

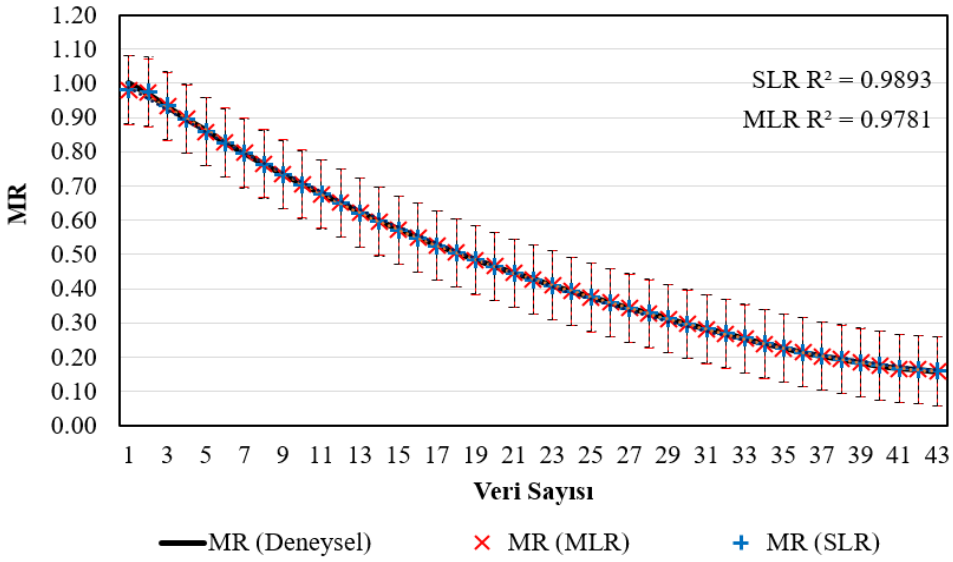
Şekil 13 ve Şekil 14'te regresyon tabanlı yapay zekâ yöntemleri ile modellenmiş kurutma sıcaklığı (Ti) ve nem oranı (MR) parametrelerinin deneysel değerleriyle karşılaştırılması verilmiştir. SLR algoritması her iki parametreyi de daha az hata ile modellemiştir.



Şekil 13. Ti Parametresinin Yapay Zekâ ve Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şekil 13'te, Ti parametresi için deneysel sonuçlar ile SLR ve MLR modellerinden elde edilen tahmin değerleri karşılaştırılmıştır. Deneysel Ti değerlerinin başlangıçta hızlı bir artış gösterdiği, daha sonra ise yaklaşık 42–45 °C aralığında kararlı bir eğilime ulaştığı görülmektedir. Bu durum, kurutma sisteminin başlangıçta ısıl dengeye ulaşma sürecini, ilerleyen aşamalarda ise daha kararlı bir çalışma rejimine geçtiğini göstermektedir. Hata çubuklarının sınırlı aralıkta kalması, tekrarlı deneylerden elde edilen sıcaklık verilerinin kabul edilebilir düzeyde tekrarlanabilir olduğunu ortaya koymaktadır. SLR ve MLR modellerinden elde edilen tahmin sonuçlarının deneysel eğriyi büyük ölçüde takip etmesi, regresyon modellerinin kurutma havası sıcaklığındaki değişimi başarılı şekilde temsil ettiğini göstermektedir. Elde edilen R^2 değerleri SLR için 0,9622 ve MLR için 0,9319 olup, her iki modelin de Ti tahmininde yüksek doğruluk sağladığını göstermektedir. SLR modelinin daha yüksek R^2 değerine sahip olması, Ti parametresinin tahmininde daha basit doğrusal modelin yeterli açıklama gücü sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, regresyon tabanlı modellerin ağırlık kontrollü kurutma sistemlerinde sıcaklık değişiminin tahmini için güvenilir bir yaklaşım olduğunu göstermektedir.

Şekil 14'te, MR parametresine ait deneysel veriler ile SLR ve MLR modellerinden elde edilen tahmin sonuçları karşılaştırılmıştır. Deneysel MR değerlerinin veri sayısına bağlı olarak düzenli şekilde azalması, kurutma süreci boyunca ürün bünyesindeki nemin kademeli olarak uzaklaştığını göstermektedir. Grafikte verilen hata çubukları, tekrarlı deneylerden kaynaklanan değişkenliğin sınırlı düzeyde kaldığını ve deneysel sonuçların tekrarlanabilirliğinin kabul edilebilir olduğunu ortaya koymaktadır. SLR ve MLR modellerine ait tahmin değerlerinin deneysel eğriyle büyük ölçüde örtüşmesi, regresyon modellerinin MR değişimini başarılı şekilde temsil ettiğini göstermektedir. Elde edilen R^2 değerleri SLR için 0,9893 ve MLR için 0,9781 olup, her iki modelin de nem oranı tahmininde yüksek açıklama gücüne sahip olduğunu göstermektedir. SLR modelinin daha yüksek R^2 değerine sahip olması, MR parametresinin tahmininde daha basit bir doğrusal modelin dahi yeterli doğruluk sağlayabildiğini ortaya koymaktadır. Tahmin değerlerinin büyük ölçüde deneysel hata aralıkları içerisinde kalması, modellerin deneysel belirsizlik sınırları açısından da güvenilir olduğunu desteklemektedir. Bu sonuçlar, regresyon tabanlı yapay zekâ modellerinin ağırlık kontrollü kurutma sistemlerinde MR değişiminin tahmini için uygulanabilir bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir



Şekil 14. MR Parametresinin Yapay Zekâ ve Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması

Tablo 5'te Ti ve MR parametrelerinin model sonuçlarının hata değerleri verilmiştir. Tablo 5 incelendiğinde, SLR modelinin hem Ti hem de MR parametreleri için MLR modeline kıyasla daha düşük MAE ve RMSE değerleri ürettiği görülmektedir. Ti parametresi için SLR modelinde MAE ve RMSE değerleri sırasıyla 0,2709 ve 0,4359 olarak elde edilirken, MLR modelinde bu değerler 0,3652 ve 0,4477 olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde MR parametresi için SLR modelinde MAE = 0,0008 ve RMSE = 0,0010 değerleri elde edilmiş, MLR modelinde ise bu değerler sırasıyla 0,0013 ve 0,0022 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, SLR modelinin incelenen veri seti için hem sıcaklık hem de nem oranı tahmininde daha başarılı bir modelleme performansı sunduğunu göstermektedir.

Tablo 5. Ti ve MR Parametreleri İçin Üretilen Modellerin Hata Değerleri

Model Parametresi	SLR MAE	SLR RMSE	MLR MAE	MLR RMSE
Kurutma Havası Sıcaklık (Ti)	0,2709	0,4359	0,3652	0,4477
Nem Oranı (MR)	0,0008	0,001	0,0013	0,0022

SONUÇLAR

Bu çalışmada, tünel tipi bir kurutma sisteminde ürün ağırlığına bağlı geri beslemeli kontrol yaklaşımının kurutma performansına etkisi iki farklı senaryo altında incelenmiştir. İlk senaryoda ürün ağırlığı 100 g değerinin altına düştüğünde hava hızı 1,2 m/s'den 2,5 m/s'ye yükseltilmiş, ikinci senaryoda ise aynı ağırlık eşiğinde kurutma havası sıcaklığı 30 °C'den 45 °C'ye çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlar, ağırlık temelli kontrol stratejisinin her iki durumda da kurutma kinetiğini olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Birinci senaryoda, klasik kurutma koşullarında sabit

hava hızı ile yürütülen işlemde ürün ağırlığında zamana bağlı düzenli bir azalma gözlenmiş, boyutsuz nem oranı (MR) düşmüş ve konvektif ısı transfer katsayısı (hc) zamanla artış göstermiştir. Ürün ağırlığı 100 g altına indiğinde hava hızının 2,5 m/s'ye yükseltilmesi ile birlikte ağırlık kaybı hızlanmış, MR daha kısa sürede daha düşük değerlere ulaşmış ve hc değerlerinde belirgin artış meydana gelmiştir. Bu durum, fan hızındaki artışın ürün yüzeyi ile kurutma havası arasındaki taşınımı kuvvetlendirdiğini ve kurutma sürecini hızlandırdığını ortaya koymuştur. İkinci senaryoda, klasik durumda 30 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen kurutma işleminde ürün ağırlığının yaklaşık 170 g'dan 48 g seviyesine düşmesi yaklaşık 320 dakika sürmüş, ürün yüzey sıcaklığı ise yaklaşık 22 °C'den 30 °C'ye yavaş bir artış göstermiştir. Ürün ağırlığı 100 g'ın altına düştüğünde sıcaklığın 45 °C'ye çıkarıldığı kontrol uygulamasında ise ürün ağırlığının yaklaşık 100 g'dan 48 g'a düşmesi yalnızca 90 dakika içinde gerçekleşmiştir. Ayrıca MR değerinin yaklaşık 0,99'dan 0.12'ye 200 dakika içinde düşmesi, sıcaklık kontrollü uygulamanın klasik yönteme göre kurutma süresini yaklaşık %33 oranında azalttığını göstermiştir. hc değerindeki artış da sıcaklık yükselmesinin ısı transferini güçlendirdiğini doğrulamıştır.

Her iki senaryo birlikte değerlendirildiğinde, ürün ağırlığının kritik eşik değer olarak kullanılmasıyla kurutma koşullarının dinamik biçimde değiştirilmesinin, sabit işletim koşullarına göre daha etkili bir kurutma sağladığı belirlenmiştir. Hava hızı artışı zorlanmış taşınım etkisini güçlendirirken, sıcaklık artışı nem uzaklaştırma potansiyelini daha belirgin şekilde yükseltmiştir. Bu nedenle incelenen çalışma koşulları altında sıcaklık kontrolü, kurutma süresinin azaltılması bakımından daha güçlü bir etki göstermiştir. Yapay zekâ tabanlı regresyon analizlerinde ise kurutma havası sıcaklığı (Ti) ve boyutsuz nem oranı (MR) parametrelerinin deneysel verilerle yüksek uyum içinde tahmin edilebildiği görülmüştür. Ti için MAE ve RMSE değerleri sırasıyla 0,2709 ve 0,4359, MR için ise 0,0008 ve 0,0010 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, geliştirilen regresyon modellerinin kurutma sürecinin izlenmesi ve tahmin edilmesinde başarılı olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, ürün ağırlığına dayalı geri beslemeli kontrol yaklaşımı tünel tipi kurutuculardа proses performansını artıran etkili bir yöntem olarak belirlenmiştir. Özellikle ürün belirli bir ağırlık seviyesinin altına ulaştığında hava hızı veya sıcaklığın yeniden düzenlenmesi, kurutma süresinin azaltılması, ısı ve kütle transferinin iyileştirilmesi ve sürecin daha kontrollü yürütülmesi açısından önemli avantajlar sağlamıştır. Elde edilen bulgular, ağırlık geri beslemeli kontrol yaklaşımının özellikle küçük ve orta ölçekli tünel tipi gıda kurutucular için uygulanabilir bir otomasyon stratejisi sunduğunu göstermektedir. Ürün ağırlığının doğrudan kontrol değişkeni olarak kullanılması, kurutma sürecinin yalnızca sabit sıcaklık veya sabit hava hızı değerleriyle değil, ürünün gerçek zamanlı nem kaybına bağlı olarak yönetilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yönüyle geliştirilen sistem, kurutma süresinin azaltılması, proses kararlılığının artırılması ve regresyon tabanlı tahmin modelleriyle birlikte daha öngörülebilir bir kurutma süreci oluşturulması açısından endüstriyel uygulamalar için potansiyel taşımaktadır.

Yapay Zekâ Katkı Beyanı

Bu çalışmada yapay zekâ yalnızca araştırma kapsamında deneysel verilerin modellenmesi ve tahmin performanslarının karşılaştırılması amacıyla kullanılmıştır. Makalede yer alan regresyon tabanlı yapay zekâ uygulamaları, çalışmanın bilimsel yönteminin bir parçası olarak değerlendirilmiştir. Bunun dışında makale metninin yazımı, yorumlanması, sonuçların tartışılması ve nihai içeriğin oluşturulması süreçleri tamamen tarafımca gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

Alic, E., Das, M., Kaska, O. (2019). Heat flux estimation at pool boiling processes with computational intelligence methods. *Processes*, 7, 1–16. https://doi.org/10.3390/pr7050293

Aniesrani Delfiya, D.S., Sneha, R., Prashob, K., Murali, S., Alfiya, P. V., Samuel, M.P. (2022). Hot air-assisted continuous infrared dryer for anchovy fish drying. *J. Food Process Eng*., 45, 1–11. https://doi.org/10.1111/jfpe.13824

Anwar, S. I., & Tiwari, G. N. (2001). Evaluation of convective heat transfer coefficient in crop drying under open sun drying conditions. *Energy conversion and management*, *42*(5), 627-637.

Aydoğmuş, E., Demirpolat, A.B., Arslanoğlu, H. (2022). Isothermal and non-isothermal drying behavior for grape (Vitis vinifera) by new improved system: exergy analysis, RSM, and modeling. *Biomass Convers. Biorefinery*, 12, 527–536. https://doi.org/10.1007/s13399-021-02034-3

Belessiotis, V., Delyannis, E. (2011). Solar drying. *Solar Energy*, 85, 1665–1691. https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.001

Çerçi, K.N., Daş, M. (2019). Modeling of heat transfer coefficient in solar greenhouse type drying systems. Sustain. 11. https://doi.org/10.3390/su11185127

Charmongkolpradit, S., Somboon, T., Phatchana, R., Sang-Aroon, W., Tanwanichkul, B. (2021). Influence of drying temperature on anthocyanin and moisture contents in purple waxy corn kernel using a tunnel dryer. *Case Stud. Therm. Eng*., 25, 100886. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.100886

Das, M., Akpinar, E.K. (2018). Investigation of pear drying performance by different methods and regression of convective heat transfer coefficient with support vector machine. *Appl. Sci*., 8. https://doi.org/10.3390/app8020215

Das, M., Alic, E., Akpinar, E. K. (2021). Detailed analysis of mass transfer in solar food dryer with different methods. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 128, 105600. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105600

Daş, M., Alıç, E., Akpınar, E. K. (2021). Numerical and experimental analysis of heat and mass transfer in the drying process of the solar drying system. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24, 236–246. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.10.003

Demirpolat, A.B., Aydoğmuş, E., Arslanoğlu, H. (2022). Drying behavior for Ocimum basilicum Lamiaceae with the new system: exergy analysis and RSM modeling. *Biomass Convers. Biorefinery*, 12, 515–526. https://doi.org/10.1007/s13399-021-02010-x

Dufera, L. T., Hofacker, W., Esper, A., Hensel, O. (2021). Physicochemical quality of twin layer solar tunnel dried tomato slices. *Heliyon*, 7, e07127. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07127

El-Mesery, H. S., ElMesiry, A. H., Hendawy, Y. T., Husein, M., Hu, Z., Mahdi, A. A. (2026). Integrating artificial intelligence and statistical analysis into a prediction model for drying performance and reduced energy consumption in industrial infrared conveyor-belt drying systems. *Journal of Agriculture and Food Research*, 27, 102876. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2026.102876

Getahun, E., Delele, M. A., Gabbiye, N., Workneh, S., Vanierschot, M. (2024). Influence of a double-stage solar tunnel dryer on the preservation of quality characteristics and the modelling of colour variations in red chili peppers. *Heliyon*, 10, e36857. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36857

Gradov, D.V., Yusuf, Y.O., Ohjainen, J., Suuronen, J., Eskola, R., Roininen, L., Koiranen, T. (2022). Modelling of a continuous veneer drying unit of industrial scale and model-based ANOVA of the energy efficiency. *Energy*, 244, 122673. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122673

Guiné, R.P.F. (2008). Pear drying: Experimental validation of a mathematical prediction model. *Food Bioprod. Process*., 86, 248–253. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2007.11.001

Hamid, K., Sajjad, U., Yang, K.S., Wu, S.K., Wang, C.C. (2022). Assessment of an energy efficient closed loop heat pump dryer for high moisture contents materials: An experimental investigation and AI based modelling. *Energy*, 238, 121819. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121819

Holman, J.P. (2012). Experimental methods for engineers, Eight Edit. ed. McGraw-Hill, New York.

Mahaboob, B., Praveen, J.P., Appa Rao, B. V., Harnath, Y., Narayana, C., Prakash, G.B. (2020). A study on multiple linear regression using matrix calculus. *Adv. Math. Sci. J.*, 9, 4863–4872. https://doi.org/10.37418/amsj.9.7.52

Muthuvairavan, G., Natarajan, S. K. (2023). Experimental study on drying kinetics and thermal modeling of drying Kohlrabi under different solar drying methods. *Thermal Science and Engineering Progress*, 44, 102074. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102074

Simo-Tagne, M., Bonoma, B., Bennamoun, L., Monkam, L., Léonard, A., Zoulalian, A., Rogaume, Y. (2019). Modeling of coupled heat and mass transfer during drying of ebony wood using indirect natural convection solar dryer. *Dry. Technol*., 37, 1863–1878. https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1544144

Sreehari, E., Pradeep Ghantasala, G.S. (2019). Climate changes prediction using simple linear regression. *J. Comput. Theor. Nanosci*., 16, 655–658. https://doi.org/10.1166/jctn.2019.7785

Yang, T., Zheng, X., Xiao, H., Shan, C., Zhang, J. (2024). Moisture content online detection system based on multi-sensor fusion and convolutional neural network. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1289783. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1289783

Zohrabi, S., Aghbashlo, M., Seiiedlou, S.S., Scaar, H., Mellmann, J. (2020). Energy saving in a convective dryer by using novel real-time exergy-based control schemes adjusting exhaust air recirculation. *J. Clean. Prod.*, 257, 120394. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120394

Zuo, Y., Jibril, A. N., Yan, J., Xia, Y., Liu, R., Chen, K. (2025). Optimization of online moisture prediction model for paddy in low-temperature circulating heat pump drying system with artificial neural network. *Sensors*, 25(7), 2308. https://doi.org/10.3390/s25072308