



Elma Dilimlerinin Konvektif Kurutulmasında Enerji Özelliklerine Etki Eden Faktörlerin Yanıt Yüzeyi Yöntemi ile Değerlendirilmesi^A

Necati ÇETİN^{1*}

Öz: Bu çalışmada, konvektif kurutma yönteminin iki farklı elma çeşidinin (Granny Smith ve Red Delicious) kurutulmasında, kurutma sıcaklığı (50, 55 ve 60°C), numune kalınlığı (5, 7 ve 9 mm) ve kuruma süresi (8, 9 ve 10 saat) gibi bağımsız değişkenlerin özgül enerji tüketimi, özgül nem çekme oranı, enerji verimliliği, termal etkinlik ve efektif nem difüzyonu özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bulgulara göre, ikinci derece polinom denklemlerinin yanıt değişkenlerini temsil etmede başarılı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca ANOVA sonuçlarına göre bağımsız değişkenlerin yanıt değişkenleri üzerinde istatistiksel olarak önemli seviyede etkili olduğu belirlenmiştir ($p<0.05$). Tüm kontrol faktörleri dikkate alındığında optimum koşulların, Granny Smith çeşidi için 50°C, 7.31 mm ve 8.00 saat (arzu edilebilirlik=0.801), Red Delicious için ise 50°C, 9.00 mm ve 8.00 saat (arzu edilebilirlik=0.847) olduğu belirlenmiştir. Optimizasyon sonuçları, konvektif kurutmanın, elma dilimleri için iyi bir performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Efektif nem difüzyonu, elma, enerji, konvektif kurutma, optimizasyon.

^A Yapılan bu çalışma etik kurul izni gerektirmemektedir. Makale araştırma ve yayın etiğine uygun olarak hazırlanmıştır.

* **Sorumlu yazar/Corresponding Author:** ¹ Necati ÇETİN, Erciyes Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, 38039, Kayseri, necatichetin@erciyes.edu.tr, [OrcID 0000-0001-8524-8272](https://orcid.org/0000-0001-8524-8272)

Atıf/Citation: Çetin, N., 2021 Elma Dilimlerinin Konvektif Kurutulmasında Enerji Özelliklerine Etki Eden Faktörlerin Yanıt Yüzeyi Yöntemi ile Değerlendirilmesi *Bursa Uludag Üniv. Ziraat Fak. Derg.*, 36(2): 265-283.

<https://doi.org/10.20479/bursauludagziraat.1051109>

Evaluation of Factors Affecting Energy Aspects of Apple Slices by Response Surface Methodology in Convective Drying

Abstract: In this study, the effects of independent variables in convective drying methods two different apple varieties (Granny Smith and Red Delicious) such as drying temperature (50, 55 and 60°C), sample thickness (5, 7 and 9 mm) and drying time (8, 9 and 10 hours) on specific energy consumption, specific moisture extraction rate, energy efficiency, thermal efficiency, and effective moisture diffusivity were investigated. According to the findings, it was determined that the quadratic polynomial equations were successful in representing the response variables. In addition, according to the ANOVA results, it was determined that the independent variables had a statistically significant effect on the response variables ($p<0.05$). Considering all control factors, optimum conditions were determined to be 50°C, 7.31 mm and 8.00 hours (desirability=0.801) for Granny Smith variety, and 50°C, 9.00 mm and 8.00 hours (desirability=0.847) for Red Delicious variety. Optimization results revealed that convective drying performed very well for apple slices.

Keywords: Effective moisture diffusivity, apple, energy, convective drying, optimization.

Giriş

Elma, meyveler arasında en çok üretilen ve tüketilen ürünlerden birisi olup beslenmede önemli bir yere sahiptir. Dünyada, 2019 yılı verilerine göre elmanın 4.717.384 ha üretim alanında 87.236.221 ton üretimi yapılmaktadır (FAOSTAT, 2021). Yıllık üretim miktarları açısından Çin, ABD ve Türkiye önde gelen üreticiler olarak karşımıza çıkmaktadır. Elmalar mevsimsel olarak hasat edildiği için hasat sonrası bozulmaya karşı oldukça hassastır. Uygun olmayan koşullarda depolandıklarında ve taşındıklarında önemli ürün kayıpları meydana gelmektedir. Bu sorunların çözümü için kurutma işlemi hasat sonrası işlemlerde önemli bir alternatif yöntemdir (Li ve ark., 2018).

Kurutma, meyveler için en yaygın muhafaza yöntemlerinin başında gelmektedir (Akpınar ve ark., 2003). Kurutma, ısı ve nem transferinin aynı anda meydana geldiği termal bir işlemdir. Tarım ürünleri veya fonksiyonel gıdaların kurutulması, termal deformasyon, oksidasyon veya enzimatik esmerleşme yoluyla ürünün bozulmasını önlemek için özel yöntemler gerektirmektedir (Marques ve Freire, 2005). Bu ürünlerin kurutulmasında öncelik, ürünlerin nemini uzun süreli güvenli depolamaya olanak sağlayacak düzeye indirmektir. Bununla birlikte kurutulmuş ürünler, düşük ağırlıkları ve hacimleri sebebiyle daha az nakliye maliyetleri ve minimum paketleme gereksinimleri sağlamaktadır (Kaya ve ark., 2011). Sıcak hava ile konvektif kurutma yöntemi en yaygın uygulanan kurutma yöntemlerinden birisidir. Yaygın olarak kullanılmasına rağmen bu kurutma yönteminde optimizasyon eksikliğinden dolayı enerji tüketimi yüksek ve enerji verimliliği düşük olmaktadır (Sahin ve Dincer, 2002).

Ürünlerin kuruma davranışını modellemek, kurutma parametrelerini optimize etmek ve kurutma sürecini kontrol ve simüle etmek için tepki yüzey yöntemi (RSM) bamyaya (Giri ve Prasad, 2007), zeytin (Erbay ve İcier, 2009), bamyaya (Kumar ve ark., 2014), kırmızı frenk üzümü (Šumić ark., 2016) ve elma (Majdi ve ark., 2019) gibi ürünlerin kurutma işleminde yaygın olarak uygulanmıştır. RSM, istatistiksel ve matematiksel tekniklerin bir kombinasyonunu temsil etmekte ve genellikle belirli yanıtın çeşitli değişkenlerden etkilendiği süreçlerin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi için kullanılmaktadır (Šumić ark., 2016).

Bu çalışma ile, tek üniteli konvektif kurutucuda kurutulan elma dilimlerinin kurutma kinetiği, efektif nem difüzyonu, enerji ve termal etkinlik özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca, kurutma sıcaklığı, ürün kalınlığı ve kuruma süresine bağlı optimize edilmiş kurutma koşullarını belirlemek için yanıt yüzey yöntemi uygulanmıştır.

Materyal ve Yöntem

Materyal

Çalışmada materyal olarak iki yaygın elma çeşidi Granny Smith ve Red Delicious kullanılmıştır. Elma örnekleri Türkiye'nin Kayseri ilinde (38°17'25.4"K, 35°06'38.0"D) bir meyve bahçesinden temin edilmiştir. Şekilsel olarak benzer ve hasarsız elmalar seçilerek kurutma işlemi süresince +4°C sıcaklıkta muhafaza edilmiştir. Çekirdeklerinin olduğu kısım elma çekirdeği çıkarıcı (Tchibo, Almanya) ile çıkarılmıştır. Ürünler, elektronik dilimleyici (Ritter, Almanya) yardımıyla silindirik olarak dilimlenmiştir. Kurutma işleminden önce örnekler yıkanarak tozdan ve kirden arındırılmış ardından kurutma işlemine tabi tutulmuştur.

Kurutma işlemleri, 1500 kg gün⁻¹ kapasiteli tek üniteli konvektif kurutma kabinde (ETHK-20M, TR) gerçekleştirilmiştir. Ortam sıcaklığı, kurutucu üzerinde bulunan PID kontrol sistemi ile 40 ile 280°C arasında ayarlanabilmektedir. Ayrıca bağıl nem, hava hızı ve kurutma süresi de PID ile kontrol edilebilmektedir. Konvektif kurutmada tüm testlerde hava hızı 0.5 ms⁻¹ olarak seçilmiştir. Örneklerin nem kaybı 60 dakikada bir hassas bir teraziyle (±0.001 g) ölçülerek kaydedilmiştir. Granny Smith ve Red Delicious için başlangıç nem içeriği sırasıyla %85.17 ve %86.37 (yaş bazda) olarak tayin edilmiştir. Kurutma işlemlerinde konvektif kurutucu içerisinde bulunan kasa boyutları dikkate alınarak 50±5 gr numune kullanılmıştır. Örnekler konvektif kurutucunun merkezine (fana ve çıkışa eşit uzaklıkta), numune taşıma araçlarının üzerindeki kasalara yerleştirilmiştir. İlk nem içeriğini belirlemek amacıyla örnekler 105°C'de 24 saat etüvde denge nemine kadar kurutulmuştur. Numuneler yanıt yüzeyi yöntemine göre testlerde 8, 9 ve 10 saat boyunca kurutulmuştur.

Yöntem

Kurutma Kinetiği ve İnce Tabaka Kurutmanın Modellenmesi

İnce tabaka kurutma sırasında elma dilimlerinin nem oranı (MR) aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır (Yaldız ve ark., 2001; Halil ve ark., 2019; Pinar ve ark., 2021):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

Burada, M_t numunenin t anındaki (kuru bazda) nem içeriği, kg kg^{-1} ; M_0 başlangıç nem içeriği (kuru bazda), kg kg^{-1} ; M_e , numunenin denge anındaki nem içeriği (kuru bazda), kg kg^{-1} 'dir.

Çalışmada tarım ürünlerin kurutulması için yaygın olarak kullanılan dört farklı matematiksel model kullanılmıştır (Çizelge 1). Kurutma eğrilerinin matematiksel modellenmesi SigmaPlot yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Modellerin uyum performansını değerlendirmek için kullanılan terimler, belirtme katsayısı (R^2), indirgenmiş ki-kare (χ^2) ve ortalama karekök hatasıdır (RMSE). En yüksek R^2 ve en düşük χ^2 ve RMSE değerleri en iyi modeli temsil etmektedir (Kaleta ve Górnicki, 2010).

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{exp},i})^2}{N}} \quad (3)$$

Burada, $MR_{\text{exp},i}$ kurutma deneylerinden elde edilen deneysel nem oranı, $MR_{\text{pre},i}$ tahmin edilen nem oranı, N deneysel veri sayısı ve z modeldeki parametre sayısıdır.

Çizelge 1. İnce tabaka kurutma matematiksel modelleri

Model	Model	Referans
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Page (1949)
Henderson&Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson ve Pabis (1961)
Newton	$MR = \exp(-kt)$	Taşkın (2020)
Wang&Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Arslan ve Özcan (2010)

k kuruma hızı sabiti, a , b ve n modelin eşitlik sabitidir.

Efektif Nem Difüzyonu

Efektif nem difüzyonu (D_{eff}) değerleri, Fick'in ikinci difüzyon yasası kullanılarak hesaplanmıştır. Nem transferinin sadece difüzyon yoluyla gerçekleştiği, büzülmenin, sabit difüzyon katsayılarının ve sıcaklığın önemsiz olduğu varsayılarak, slab (dilim) geometrisi için denklemin genel çözümü aşağıda sunulmuştur (Crank, 1975):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}\right) \quad (4)$$

Burada; D_{eff} efektif nem difüzyonu (m^2sn^{-1}), L elma diliminin yarı kalınlığı (m), t kuruma süresidir. Daha uzun kuruma süreleri için, çözümde yukarıdaki denklemin ilk terimi aşağıdaki şekilde kullanılmaktadır. Kuruma süresi grafiğinin $\ln(MR)$ 'ye karşı eğimi, aşağıdaki denklemde bulunan k_0 'ı vermektedir.

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (5)$$

$$k_0 = \frac{D_{eff} \pi^2}{4L^2} \quad (6)$$

Enerji ve Termal Etkinlik Analizleri

Konvektif kurutucuda, enerji tüketimi (E_c) değerleri aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır (Horuz ve ark., 2017):

$$E_c = Av \rho_a C_a \Delta T t \quad (7)$$

Burada; E_c , her bir kurutma koşulu için toplam enerji tüketimi (kWh), A , numunelerin yerleştirildiği plakanın kesit alanı (m^2), v hava akış hızı (ms^{-1}), ρ_a hava yoğunluğu ($kg m^{-3}$), C_a havanın özgül ısısı ($kJ kg^{-1} ^\circ C$), ΔT sıcaklık farkı ($^\circ C$), t toplam kuruma süresidir (h).

Özgül enerji tüketimi (SEC), numuneden bir birim suyu buharlaştırmak için gereken enerjiyi göstermektedir. Özgül nem çekme oranı (SMER), kWh enerji başına net nem çekme miktarını (kg) ifade etmektedir. Enerji verimliliği (η_{en}), numunedeki suyu buharlaştırmak için kullanılan ısı enerjisinin kurutucu tarafından sağlanan ısıya oranı olup bu özellikler Denklem 8-10 kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca, “malzemenin gizli ve özgül ısı kapasitesi” Denklem 11 kullanılarak hesaplanmıştır (Motevali ve ark., 2016; Taşkın, 2020).

$$SEC = \frac{E_c}{m_w} \quad (8)$$

$$SMER = \frac{m_w}{E_c} \quad (9)$$

$$\eta_{en} = \frac{m_w \lambda_{wp}}{E_c} \quad (10)$$

$$\frac{\lambda_{wp}}{\lambda_w} = 1 + 23 \exp(-0.4X) \quad (11)$$

Burada, m_w buharlaşan suyun kütesini (kg), X numunenin nem içeriğini ($kg \text{ water } kg \text{ dry matter}^{-1}$), λ_w suyun gizli ısısını ($J kg^{-1}$) and λ_{wp} ürünün gizli ısısını ($J kg^{-1}$) temsil etmektedir.

Termal etkinlik, termal enerji kullanan bir cihazda enerji dönüşümü veya taşıma işleminin ne kadar iyi gerçekleştiğini göstermektedir. Kurutmada termal verim, numunenin nemini buharlaştırma gizli ısısının, serbest sudan nemi buharlaştırmak için gereken enerji miktarına oranı olarak tanımlanmaktadır. Denklem 12 kullanılarak termal etkinlik değerleri hesaplanmıştır (Beigi, 2016a):

$$\eta_{th} = \frac{P A \lambda_w (M_o - M_e)}{F t (100 - M_e)} \quad (12)$$

Burada, P, A, λ_w , m_w , F ve t sırasıyla sistemdeki ürün miktarını (kg m^{-2}), tepsi alanını (m^2), suyun buharlaşma gizli ısısını (kJ kg^{-1}), üründen buharlaşan su miktarını (kg), kurutucunun ısıtma kapasite kullanımını (kW) ve kurutma süresini temsil etmektedir.

Numunelerin gizli buharlaşma ısısı, konvektif kurutucu için ortam basıncındaki gizli ısıya eşit kabul edilmiş olup aşağıdaki denklemler ile hesaplanmıştır (Aghbashlo ve ark., 2012).

$$\lambda_w = 2.503 \times 10^6 - 2.386 \times 10^3 (T - 273.16) \quad (13)$$
$$273.16 \leq T(^{\circ}K) \leq 338.72$$

$$\lambda_w = (7.33 \times 10^{12} - 1.60 \times 10^7 T^2)^{0.5} \quad (14)$$
$$338.72 \leq T(^{\circ}K) \leq 533.16$$

Yanıt Yüzeyi Yöntemi ve İstatistiksel Analiz

Yanıt yüzeyi yöntemi (RSM), çok değişkenli problemlerin optimizasyonu için kullanılan istatistiksel bir prosedürdür. RSM, bir veya daha fazla ölçülen yanıt ile çoklu girdi değişkenleri arasındaki ilişkileri ortaya çıkarmaktadır. RSM ayrıca daha az sayıda deneme ile güvenilir istatistiksel sonuçlar sunabilmektedir (Kaur ve ark., 2009). Bu çalışmada, incelenen parametrelerde ikinci dereceden bir polinom denklemine dayalı tahmin modelleri geliştirmek için merkez noktasında üç tekrarlı 3 faktörlü ve 3 seviyeli Box-Behnken deneysel tasarımı (Box ve Behnken, 1960) kullanılmıştır (Karaman ve Sağdıç, 2019). Kurutma sıcaklığı (50, 55, 60 °C), örnek kalınlığı (5, 7, 9 mm) ve kurutma süresi (8, 9, 10 saat) bağımsız değişkenleri ile Box-Behnken tasarımı gerçekleştirilmiştir (Çizelge 2).

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^N \beta_i X_i + \sum_{i=1}^N \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ i < j}}^N \sum_{j=i+1}^N \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (15)$$

Burada, Y tahmin edilen yanıt değerini, β_0 kesişme terimi, β_i doğrusal terimi, β_{ii} ikinci dereceden terimi, β_{ij} etkileşim terimi, x_i ve x_j bağımsız değişkenlerin kodlanmış seviyelerini, N girdi değişkenlerinin sayısını ve ε standart rastgele hatayı göstermektedir. Kuadratik terimlerinin regresyon katsayıları, her bir çıktı parametresi için Design-Expert® yazılımı (Design Expert, 2021) kullanılarak belirlenmiştir.

Arzu Edilebilirlik (Desirability) Fonksiyonu Yaklaşımı

Arzu edilebilirlik (Desirability) fonksiyonu, tüm yanıtların, boyutsuz arzu edilebilirlik skalasını içeren “desirability fonksiyonu” olarak ifade edilen bir fonksiyon altında birleşmesini içermektedir. Ayrıca bu fonksiyonun arzu edilen sonuçları verecek şekilde maksimize edilmesini kapsamaktadır. Bu yöntemin avantajları, farklı skalaya sahip yanıtların beraber ele alınabilmesi, yanıtların bir fonksiyona dönüştürülebilmesi, kalitatif ve kantitatif yanıtların kullanılabilmesidir. Her bir yanıt değişkeni için arzu edilebilirlik fonksiyonu d

ile temsil edilir. Arzu edilebilirlik fonksiyonu, tüm yanıtların bir araya toplandığı, 0 ile 1 arasında tek bir yanıt indeksidir. Bu değer 1'e yaklaşması çalışmada belirlenen kriterlerin sağlandığını belirtmektedir. Eğer 0 değerini almış ise yanıt değişkeninin belirlenen bölgenin dışında bir değer aldığına karar verilir. Optimizasyon çalışmalarında her bir yanıt için seçilen kritere (minimum, maksimum, belli bir aralıkta olması) bağlı olarak farklı arzu edilebilirlik fonksiyonları uygulanmaktadır (Montgomery, 2001; Koç ve Kaymak-Ertekin, 2010).

Amaç yanıt değişkeninin maksimum olduğu noktaya ulaşmaksa Denklem 16 ile;

$$d = \begin{cases} 0 & y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^r & L \leq y \leq T \\ 1 & y > T \end{cases} \quad (16)$$

Amaç yanıt değişkeninin minimum olduğu noktaya ulaşmaksa Denklem 17 ile;

$$d = \begin{cases} 0 & y < L \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^r & T \leq y \leq U \\ 1 & y > U \end{cases} \quad (17)$$

Amaç yanıt değişkeninin belirli bir aralıkta olduğu noktaya ulaşmaksa Denklem 18 ile hesaplanmaktadır;

$$d = \begin{cases} I & y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^{r_1} & L \leq y \leq T \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^{r_2} & T \leq y \leq U \\ 0 & y > U \end{cases} \quad (18)$$

Bu fonksiyonlarda L alt sınır değerini, U üst sınır değerini, T hedef değerini gösterir. Ayrıca r, r₁ ve r₂ hedef değere ulaşmanın ne kadar önemli olduğunu ve bu yanıtın ürünün toplam arzu edilebilirliğindeki rolünü belirleyen ağırlık sabitleridir.

Her bir yanıt için arzu edilebilirlik fonksiyonları tanımlandıktan sonra geometrik ortalamaları alınarak hepsi için tek bir toplu arzu edilebilirlik fonksiyonu (D) elde edilir. Ağırlık katsayılarına ilave olarak her bir yanıtın optimizasyondaki önemliliğini belirten 1'den 5'e kadar önemlilik derecesi (v_i) verilmektedir. Son toplu arzu edilebilirlik fonksiyonu i adet yanıt için aşağıdaki Denklem 19 ile elde edilir (Montgomery, 2001; Myers ve Montgomery, 2002).

$$D = \left(\prod_i^n d_1^{v_i} \right)^{1/\sum v_i} \quad (19)$$

Belirsizlik Analizi

Belirsizlik analizi, hata analizi için hassas bir yöntem olarak kabul edilir. Deneysel çalışmalarda elde edilen veriler için ölçülen değerlerin doğruluğunun test edilmesi önemlidir. Deneysel sırasında oluşabilecek hatalar doğruluğu etkileyen en önemli faktörlerdir. Bu çalışmada, bir parametrenin ölçümündeki toplam hata sabit, rastgele ve süreç hataları dikkate alınarak Denklem 20 kullanılarak hesaplanmıştır (Akpınar, 2010).

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} w_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (20)$$

Burada, R ölçülecek büyüklüğü, x_1, x_2, x_3 ve $\dots x_n$ bu büyüklüğü etkileyen n sayıda bağımsız değişkeni, $w_1, w_2, w_3, \dots w_n$ her bağımsız değişken için hata oranlarını ve W_R , R büyüklüğünün toplam belirsizliğini temsil etmektedir.

Çizelge 2. Box-Behnken tasarımı bağımsız değişkenleri ve seviyeleri

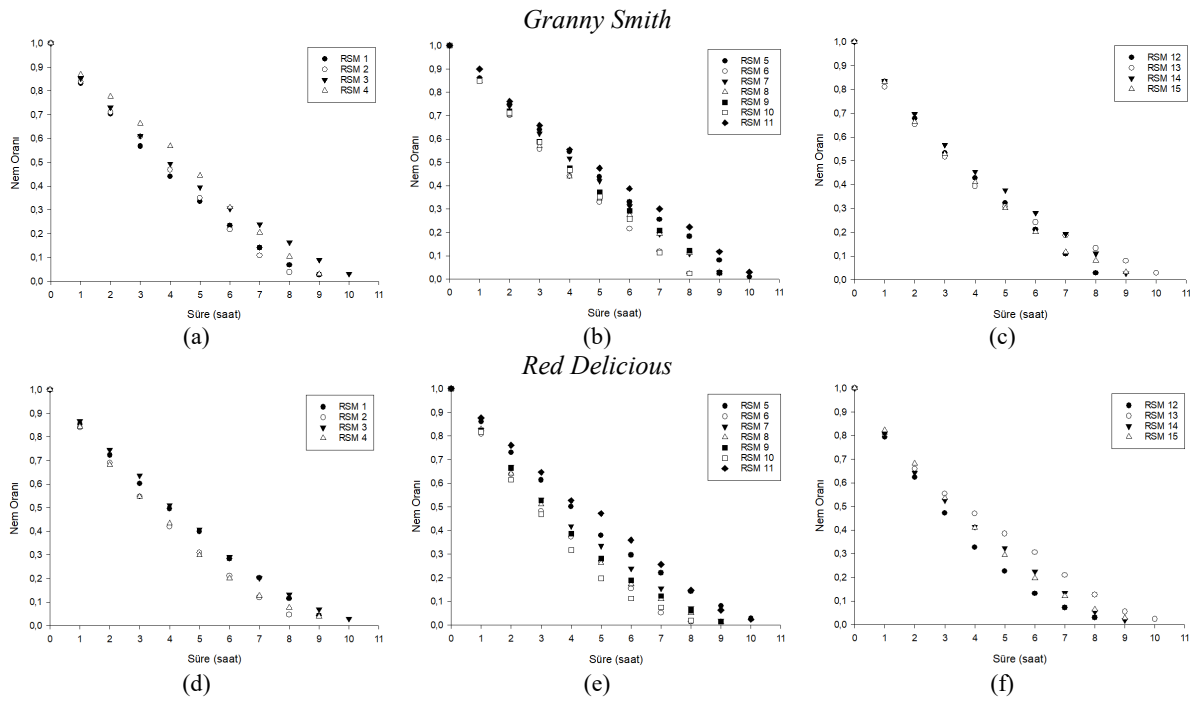
Bağımsız değişkenler	Birim	Sembol	Seviye 1 Düşük (-1)	Seviye 2 Orta (0)	Seviye 3 Yüksek (1)
Sıcaklık	°C	T	50	55	60
Ürün kalınlığı	mm	ST	5	7	9
Kurutma süresi	h	DT	8	9	10
Box–Behnken tasarımı					
No	Sıcaklık	Ürün kalınlığı	Kurutma süresi		
1	50	5	9		
2	50	7	8		
3	50	7	10		
4	50	9	9		
5	55	9	10		
6	55	5	8		
7	55	7	9		
8	55	7	9		
9	55	7	9		
10	55	9	8		
11	55	5	10		
12	60	7	8		
13	60	7	10		
14	60	5	9		
15	60	9	9		

Bulgular ve Tartışma

Kurutma Kinetiği ve Matematiksel Modelleme

Farklı kurutma sıcaklıklarında, ürün kalınlıklarında ve sürelerde elma dilimleri konvektif kurutma yöntemi ile kurutulmuştur. Elma dilimlerinin kurutulması için deneysel veriler nem oranına dönüştürülmüş ve dört farklı matematiksel model ile değerlendirilmiştir. Çizelge 3, kurutma süresi ile nem oranı için eğri uydurma hesaplamalarından elde edilen R^2 , RMSE ve χ^2 değerlerini göstermektedir. Elma dilimlerinin kuruma davranışını

tanımlayan en iyi model, en yüksek R^2 , en düşük RMSE ve χ^2 değerlerine göre seçilmiştir. Buna göre, mevcut çalışmada kurutmayı en başarılı şekilde açıklayan model Wang&Singh olmuştur. Wang&Singh modelinin Granny Smith çeşidi için R^2 , RMSE ve χ^2 değerleri sırasıyla 0.9959 ile 0.9998, 0.0040 ile 0.0194 ve 2.05×10^{-6} ile 4.58×10^{-4} arasında değişmiştir. Red Delicious çeşidi için Wang&Singh modelinin R^2 , RMSE ve χ^2 değerleri ise sırasıyla 0.9927 ile 0.9999, 0.0023 ile 0.0257 ve 6.57×10^{-6} ile 8.06×10^{-4} arasında değişmiştir. Kurutma kinetiğine iyi uyan Wang & Singh modeli, tüm kurutma davranışını açıklamak için kullanılabilir. Konvektif kurutucuda elma dilimlerinin RSM uygulamalarına göre farklı sıcaklıklarda nem oranına karşı kuruma süresi eğrileri Şekil 1'de sunulmuştur. Eğrilerin ortak eğilimi, tipik bir kuruma eğrisine benzer olarak elde edilmiştir. Kurutmanın ısınmadan sonraki aşamasında elmalardan nemin uzaklaştırılması hızlı meydana gelmiştir. Bu koşullar, ürünlerin merkezi ve yüzeyi arasında büyük bir buhar basıncı farkı oluşturarak daha hızlı su buharı difüzyonuna neden olabilir (Horuz ve ark., 2018).



Şekil 1. Elma dilimlerinin farklı sıcaklıklardaki RSM uygulamalarına göre kurutma eğrileri; Granny Smith için 50 °C (a), 55 °C (b), 60 °C (c) ve Red Delicious için 50 °C (d), 55 °C (e), 60 °C (f)

Horuz ve ark. (2018), 50, 60 70°C konvektif kurutucuda elma dilimlerinin kuruma davranışını Page, Henderson&Pabis ve Newton modelleriyle tanımlamış ve mevcut çalışmayla benzer sonuçlar elde etmiştir. Cruz ve ark. (2015), 30, 40, 50 ve 60°C konvektif kurutucuda kuruttukları Granny Smith çeşidi elmaların kuruma davranışını modellemişler, Page ve Henderson&Pabis modellerinin başarılı sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir. Contreras ve ark. (2008), 50°C sıcaklıkta konvektif yöntemle kurutulmuş elma dilimleri için Page modelini kullanarak kuruma davranışını modellemişlerdir. Sonuçların çalışmamızla uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 3. İnce tabaka kurutma modellerinden elde edilen istatistiksel analiz sonuçları

No	Model	Page		Henderson&Pabis		Newton		Wang&Singh	
		Çeşit	Granny	Red	Granny	Red	Granny	Red	Granny
1	R ²	0.9928	0.9903	0.9708	0.9684	0.9657	0.9629	0.9995	0.9996
	RMSE	0.0268	0.0301	0.0541	0.0514	0.0587	0.0588	0.0067	0.0061
	χ ²	8.98x10 ⁻⁴	1.13x10 ⁻³	3.66x10 ⁻³	3.30x10 ⁻³	3.83x10 ⁻³	3.84x10 ⁻³	5.66x10⁻⁵	4.72x10⁻⁵
2	R ²	0.9854	0.9947	0.9518	0.9733	0.9450	0.9678	0.9982	0.9999
	RMSE	0.0380	0.0226	0.0690	0.0473	0.0737	0.0558	0.0131	0.0023
	χ ²	1.86x10 ⁻³	6.58x10 ⁻⁴	6.11x10 ⁻³	2.87x10 ⁻³	6.11x10 ⁻³	3.50x10 ⁻³	2.22x10 ⁻⁴	6.57x10⁻⁶
3	R ²	0.9933	0.9939	0.9762	0.9648	0.9714	0.9567	0.9995	0.9986
	RMSE	0.0250	0.0249	0.0472	0.0556	0.0517	0.0662	0.0066	0.0120
	χ ²	7.65x10 ⁻⁴	7.56x10 ⁻⁴	2.72x10 ⁻³	3.78x10 ⁻³	2.94x10 ⁻³	4.82x10 ⁻³	5.31x10⁻⁵	1.77x10 ⁻⁴
4	R ²	0.9848	0.9964	0.9380	0.9766	0.9272	0.9712	0.9981	0.9989
	RMSE	0.0389	0.0192	0.0786	0.0449	0.0852	0.0539	0.0138	0.0104
	χ ²	1.89x10 ⁻³	4.59x10 ⁻⁴	7.73x10 ⁻³	2.52x10 ⁻³	8.07x10 ⁻³	3.23x10 ⁻³	2.39x10 ⁻⁴	1.36x10 ⁻⁴
5	R ²	0.9859	0.9944	0.9590	0.9733	0.9524	0.9672	0.9991	0.9997
	RMSE	0.0368	0.0233	0.0628	0.0475	0.0676	0.0565	0.0091	0.0051
	χ ²	1.65x10 ⁻³	6.65x10 ⁻⁴	4.82x10 ⁻³	2.76x10 ⁻³	5.03x10 ⁻³	3.51x10 ⁻³	1.02x10 ⁻⁴	3.16x10⁻⁵
6	R ²	0.9905	0.9904	0.9633	0.9724	0.9564	0.9686	0.9998	0.9986
	RMSE	0.0308	0.0316	0.0604	0.0509	0.0659	0.0571	0.0040	0.0119
	χ ²	1.22x10 ⁻³	1.28x10 ⁻³	4.69x10 ⁻³	3.33x10 ⁻³	4.88x10 ⁻³	3.67x10 ⁻³	2.05x10⁻⁵	1.83x10 ⁻⁴
7	R ²	0.9854	0.9916	0.9549	0.9781	0.9478	0.9749	0.9993	0.9985
	RMSE	0.0375	0.0286	0.0658	0.0439	0.0708	0.0493	0.0083	0.0120
	χ ²	1.76x10 ⁻³	1.02x10 ⁻³	5.41x10 ⁻³	2.40x10 ⁻³	5.57x10 ⁻³	2.70x10 ⁻³	8.59x10 ⁻⁵	1.79x10 ⁻⁴
8	R ²	0.9935	0.9963	0.9779	0.9798	0.9732	0.9754	0.9985	0.9997
	RMSE	0.0247	0.0197	0.0456	0.0425	0.0502	0.0505	0.0118	0.0060
	χ ²	7.61x10 ⁻⁴	4.87x10 ⁻⁴	2.60x10 ⁻³	2.26x10 ⁻³	2.80x10 ⁻³	2.84x10 ⁻³	1.74x10 ⁻⁴	4.48x10⁻⁵
9	R ²	0.9905	0.9961	0.9716	0.9792	0.9664	0.9749	0.9989	0.9998
	RMSE	0.0298	0.0200	0.0514	0.0430	0.0559	0.0506	0.0099	0.0040
	χ ²	1.11x10 ⁻³	5.02x10 ⁻⁴	3.31x10 ⁻³	2.31x10 ⁻³	3.47x10 ⁻³	2.85x10 ⁻³	1.23x10 ⁻⁴	2.03x10⁻⁵
10	R ²	0.9841	0.9978	0.9538	0.9791	0.9469	0.9744	0.9990	0.9987
	RMSE	0.0394	0.0154	0.0672	0.0435	0.0720	0.0524	0.0100	0.0116
	χ ²	1.99x10 ⁻³	3.04x10 ⁻⁴	5.80x10 ⁻³	2.44x10 ⁻³	5.83x10 ⁻³	3.09x10 ⁻³	1.29x10 ⁻⁴	1.73x10 ⁻⁴
11	R ²	0.9856	0.9843	0.9602	0.9520	0.9519	0.9434	0.9984	0.9977
	RMSE	0.0362	0.0395	0.0602	0.0655	0.0662	0.0750	0.0122	0.0153
	χ ²	1.60x10 ⁻³	1.90x10 ⁻³	4.43x10 ⁻³	5.24x10 ⁻³	4.82x10 ⁻³	6.18x10 ⁻³	1.81x10 ⁻⁴	2.85x10 ⁻⁴
12	R ²	0.9895	0.9966	0.9692	0.9820	0.9645	0.9789	0.9992	0.9998
	RMSE	0.0320	0.0188	0.0547	0.0403	0.0588	0.0465	0.0089	0.0041
	χ ²	1.31x10 ⁻³	4.54x10 ⁻⁴	3.85x10 ⁻³	2.08x10 ⁻³	3.89x10 ⁻³	2.43x10 ⁻³	1.02x10 ⁻⁴	2.15x10⁻⁵
13	R ²	0.9971	0.9834	0.9930	0.9757	0.9918	0.9747	0.9959	0.9927
	RMSE	0.0162	0.0388	0.0253	0.0464	0.0192	0.0479	0.0194	0.0257
	χ ²	3.19x10 ⁻⁴	1.84x10 ⁻³	7.81x10 ⁻⁴	2.63x10 ⁻³	4.07x10 ⁻⁴	2.52x10 ⁻³	4.58x10 ⁻⁴	8.06x10 ⁻⁴
14	R ²	0.9893	0.9893	0.9747	0.9779	0.9712	0.9757	0.9981	0.9973
	RMSE	0.0314	0.0322	0.0483	0.0448	0.0515	0.0486	0.0132	0.0161
	χ ²	1.24x10 ⁻³	1.30x10 ⁻³	2.91x10 ⁻³	2.51x10 ⁻³	2.94x10 ⁻³	2.62x10 ⁻³	2.18x10 ⁻⁴	3.25x10 ⁻⁴
15	R ²	0.9962	0.9955	0.9810	0.9770	0.9770	0.9726	0.9996	0.9996
	RMSE	0.0194	0.0213	0.0435	0.0453	0.0479	0.0527	0.0064	0.0061
	χ ²	4.71x10 ⁻⁴	5.69x10 ⁻⁴	2.37x10 ⁻³	2.56x10 ⁻³	2.55x10 ⁻³	3.09x10 ⁻³	5.17x10⁻⁵	4.61x10⁻⁵

*Kalın rakamlar en iyi sonuçları temsil etmektedir.

Efektif Nem Difüzyon Katsayısı

Elma örneklerinin efektif nem difüzyon katsayısı belirlemek amacıyla deneysel veriler kullanılarak Ln (MR) grafikleri çizdirilmiştir. Difüzyonlar, grafiklerin eğimlerinden hesaplanmıştır. Bu çalışmada Granny Smith için D_{eff} değerlerinde 8.86×10^{-10} ve $2.00 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, Red Delicious için ise 8.54×10^{-10} ve $1.03 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ arasında değişiklik göstermiştir (Çizelge 4). Her iki çeşitte de numuneler daha yüksek kalınlıklarda kurutulduğunda daha düşük efektif nem difüzyonuna neden olmuştur ($p < 0.05$, Çizelge 5). Yüksek sıcaklık, iç nemin buharlaşmasını tetikleyerek basıncı ve etkili nem difüzyonunu artırmaktadır. Ayrıca hava sıcaklığındaki artış ve ürüne ısı penetrasyonun, su moleküllerini harekete geçirerek ve su hareketini hızlandırarak nem difüzyonunu artırmaktadır (Chayjan ve ark., 2017).

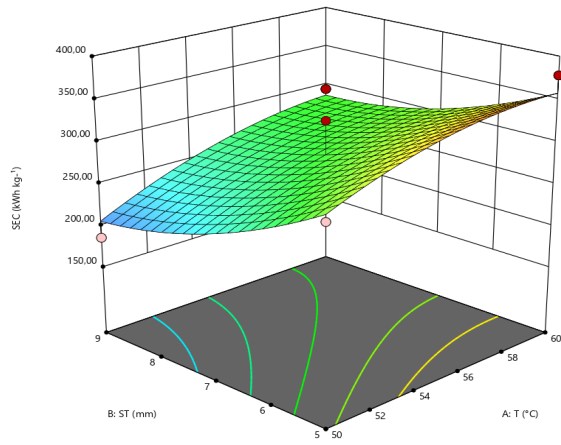
Bu çalışmadan elde edilen D_{eff} değerlerinin literatür ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Tepe ve Tepe (2020), 50, 60 ve 70 °C'de konvektif yöntemle kuruttukları elma dilimleri için D_{eff} değerlerinin 3.38×10^{-10} ile $6.25 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ arasında değiştiğini bildirmişlerdir. Artan hava sıcaklığının D_{eff} 'i artırdığını bildirmişlerdir. Beigi (2016b), 50, 60 ve 70 °C'de konvektif yöntemle kuruttukları elma dilimlerinin D_{eff} değerlerini sırasıyla 7.03×10^{-10} , 8.48×10^{-10} and $1.08 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ olarak belirlemişlerdir. Obajemih ve ark. (2021), konvektif yöntemle domates kurutmada farklı çeşit (Hausa, Tiwantiwa, ve Roma VFN), kalınlık (5, 7.5, 10 mm) ve kurutma sıcaklıkları (45, 55 ve 65 °C) için RSM uygulamışlardır. D_{eff} değerlerinin kurutma sıcaklığının 45°C'den 65°C'ye artmasıyla 1.5×10^{-8} 'den $2.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 'e arttığını bildirmişlerdir. Çalışmada sıcaklığın ve çeşidin istatistiksel olarak çok önemli ($P < 0.0001$) olduğu, dilim kalınlığının ise önemli ($P > 0.05$) olmadığı sonucunu bildirmişlerdir. Bununla birlikte modelin R^2 değerini 0.7150 olarak belirlemişlerdir.

Çizelge 4. Enerji analizi sonuçları

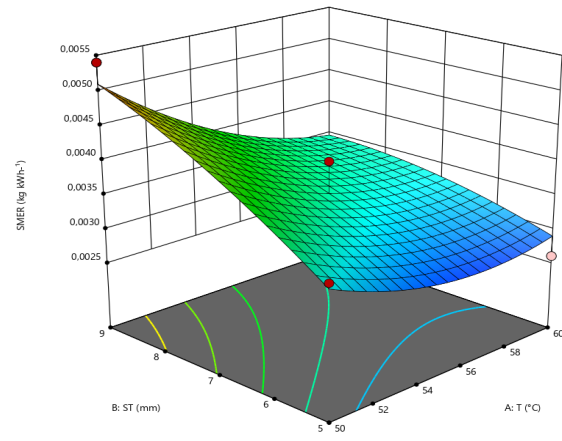
No	E_c (kWh)	SEC (kWh kg ⁻¹)		SMER (kg kWh ⁻¹)		η_{en} (%)		η_{th} (%)		D_{eff} ($\times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)	
	Ortak değer	Granny	Red	Granny	Red	Granny	Red	Granny	Red	Granny	Red
1	9.91	294.82	383.95	0.0034	0.0026	8.08	6.20	8.34	7.94	2.58	2.20
2	8.81	208.65	249.79	0.0048	0.0040	11.42	9.54	9.05	8.72	5.06	4.28
3	11.01	236.70	228.11	0.0042	0.0044	10.06	10.44	7.45	7.49	4.17	4.52
4	9.91	185.68	217.71	0.0054	0.0046	12.83	10.94	8.30	8.06	7.71	8.04
5	13.54	258.97	316.45	0.0039	0.0032	9.15	7.49	7.58	7.51	8.12	7.22
6	10.84	288.17	360.58	0.0035	0.0028	8.22	6.57	9.48	9.88	2.79	3.34
7	12.19	283.48	328.12	0.0035	0.0030	8.36	7.22	8.36	8.60	4.67	5.21
8	12.19	325.93	300.24	0.0031	0.0033	7.27	7.89	8.27	8.81	4.57	5.91
9	12.19	248.01	303.23	0.0040	0.0033	9.56	7.82	8.37	8.74	4.57	5.61
10	10.84	222.22	307.82	0.0045	0.0032	10.66	7.70	9.24	9.68	8.86	1.03
11	13.54	335.67	426.59	0.0030	0.0023	7.06	5.56	7.43	7.57	2.00	2.33
12	12.82	243.53	313.11	0.0041	0.0032	9.68	7.53	9.34	9.30	5.36	5.81
13	16.03	281.43	426.82	0.0036	0.0023	8.38	5.52	7.49	7.72	4.32	4.62
14	14.42	378.10	463.07	0.0026	0.0022	6.24	5.09	8.38	8.61	2.36	2.79
15	14.42	294.98	317.72	0.0034	0.0031	7.99	7.42	8.17	8.30	8.12	8.54

Çizelge 5. İkinci dereceden polinom modelinin varyans analizi (ANOVA) sonuçları

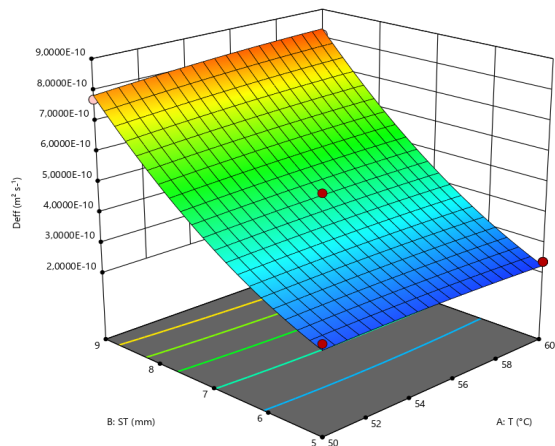
Kaynak	sd	Granny Smith					Red Delicious				
		SEC	SMER	Deff	η_{en}	η_{th}	SEC	SMER	Deff	η_{en}	η_{th}
Model	5	3.51	4.70*	157.70*	4.81*	91.24*	9.19*	7.40*	1.91	7.19*	157.70*
Sıcaklık(A)	1	9.28*	13.31*	1.04	14.37*	0.91	29.46*	28.51*	0.31	28.37*	1.04
Kalınlık(B)	1	14.05*	17.49*	1351.36*	17.13*	1.82	34.08*	21.83*	8.30*	21.78*	1351.36*
Süre(C)		2.83	3.83	30.37*	4.00	805.73*	4.20	1.24	0.74	1.15	30.37*
AxB	1	0.17	2.28	2.01	2.54	0.91	0.13	3.00	0.01	2.47	2.01
AxC		0.02	0.016	0.11	0.01	1.96	5.55	4.18	0.17	3.60	0.11
BxC		0.03	0.016	0.01	0.03	4.78	1.00	0.62	4.28	0.27	0.01
A2	1	0.89	2.22	0.30	2.34	2.14	0.20	2.52	0.40	2.24	0.30
B2	1	1.22	0.47	31.86*	0.55	0.48	7.79*	4.16	0.70	4.31	31.86*
C2		2.84	2.60	2.62	2.27	2.09	0.01	0.01	2.19	0.01	2.62
Kalıntı	7										
Uyum eks.	3	0.43	0.63	23.97*	0.46	3.70	5.21	4.94	40.22*	6.57	23.97*
Hata	4										
Toplam	12										
R2		0.8633	0.8942	0.9965	0.8964	0.9939	0.9430	0.9302	0.7743	0.9283	0.9965



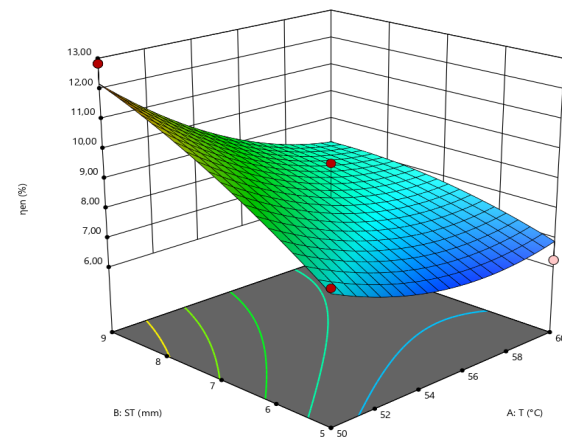
(a)



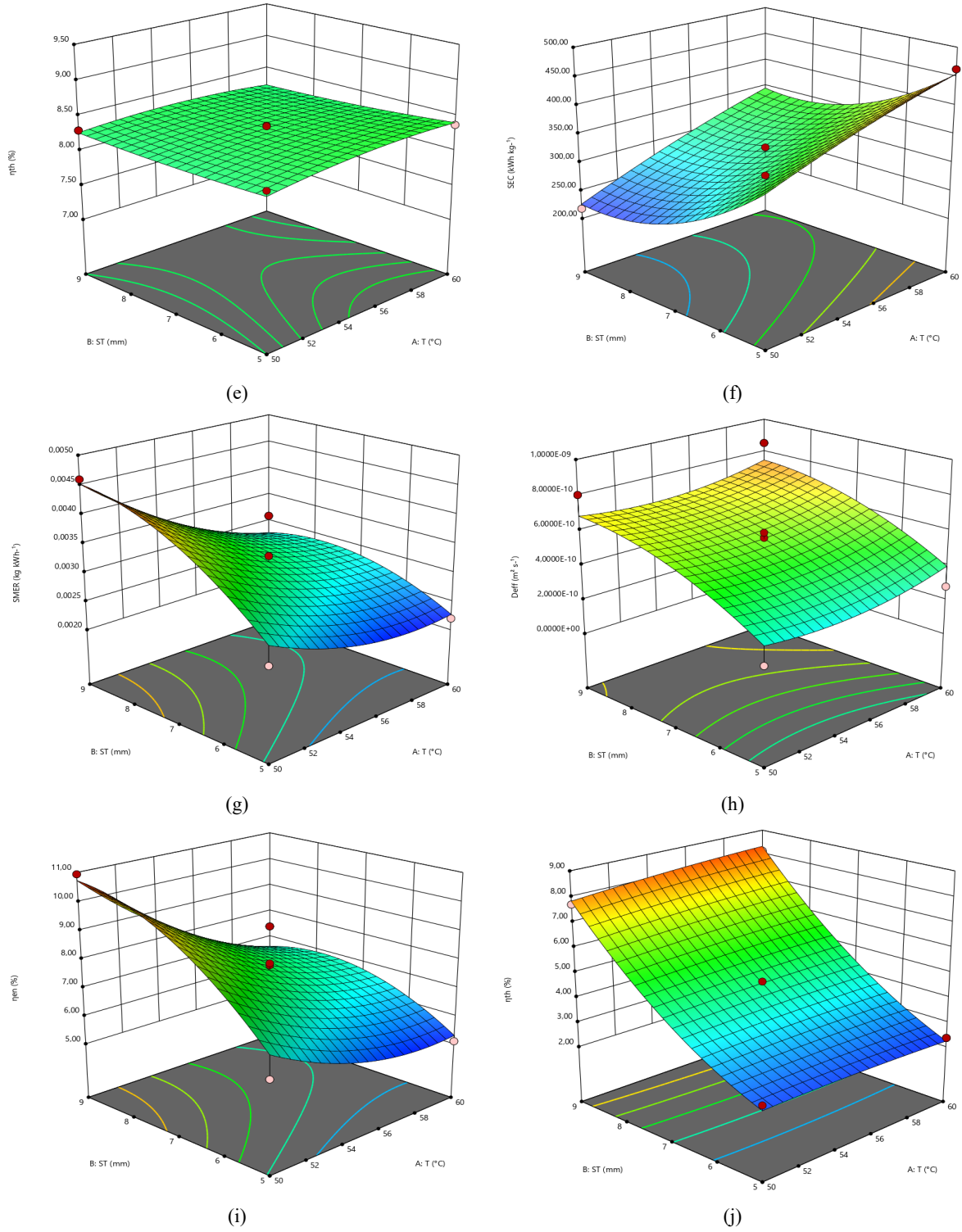
(b)



(c)



(d)



Şekil 2. Ürün kalınlığının (ST) ve sıcaklığın (T) yanıt değişkenleri üzerine etkisi; Granny Smith için SEC (a), SMER (b), D_{eff} (c), η_{en} (d), η_{th} (e) ve Red Delicious için SEC (f), SMER (g), D_{eff} (h), η_{en} (i), η_{th} (j)

Enerji ve Termal Etkinlik Analizleri

Enerji tüketimi, özgül enerji tüketimi, özgül nem çekme oranı, enerji etkinliği ve termal etkinlik değerleri Çizelge 4'te verilmiştir. Her iki çeşit için de enerji tüketimi değerleri 8.81 ile 16.03 kWh arasında değişmiştir. En yüksek SEC değerleri Granny Smith ve Red Delicious için 14. RSM uygulamasında sırasıyla 378.10 ve 463.07 kWh kg⁻¹ olarak gerçekleşmiştir. Bununla birlikte en düşük SMER değerleri ise yine aynı uygulamada sırasıyla 0.0026 ve 0.0022 kg kWh⁻¹ olarak belirlenmiştir. Enerji verimliliği açısından en etkili uygulama 4. RSM uygulaması olurken değerler Granny Smith için %12,83, Red Delicious için %10.94 olmuştur. Granny Smith ve Red Delicious için en yüksek termal etkinlik değerleri 6. RSM uygulamasında sırasıyla %9.48 ve %9.88 olarak belirlenmiştir. Çizelge 5'te görüldüğü gibi her iki çeşit için sıcaklık ve ürün kalınlığı, özgül enerji tüketimi, özgül nem çekme oranı ve enerji etkinliği üzerinde önemli bir etki göstermiştir (p<0.05). Bununla birlikte her iki çeşitte de kurutma süresinin termal etkinlik üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir (p<0.05). Her iki çeşit için elma örneklerinin özgül nem çekme oranı ve enerji etkinliği için R² değerleri, Granny Smith için sırasıyla 0.8942 ve 0.8964, Red Delicious için sırasıyla 0.9302 ve 0.9283 olarak ortaya konulmuştur. Ayrıca elma örneklerinin özgül nem çekme oranı değişimi ikinci dereceden modele iyi bir uyum yeteneği göstermiştir (p<0.05, Çizelge 5). Şekil 2'de görüldüğü gibi ürün kalınlığının artmasıyla özgül nem çekme oranında (SMER) bir artış gözlenmiştir. Buna ilaveten sıcaklıklardaki artış özgül enerji tüketiminde önemli bir azalma sağlamıştır.

Taheri-Garavand ve ark. (2018), konvektif yöntemle muz dilimlerinin kurutulmasında farklı kurutma sıcaklıkları (60, 70 ve 80°C), hava hızları (0.5, 1.0 ve 1.5 ms⁻¹) ve farklı kurutma sürelerinde (40, 100, 160, 220 ve 280 dk.) RSM uygulamışlardır. Çalışmada enerji etkinliği değerlerinin 0.536 ile 0.930 arasında değiştiğini bildirmişlerdir. Bunun yanı sıra RSM için tüm faktörleri istatistiksel olarak çok önemli bulmuşlardır (p<0.0001). Modelin R² değerini ise 0.9680 olarak bildirmişlerdir. Farklı kurutma koşulları ve farklı ürün sebebiyle araştırmanın enerji etkinliği bulguları çalışmamızla uyumlu olmamasına rağmen RSM'nin ANOVA sonuçları çalışmamızla benzerlik göstermiştir. Abbaspour-Gilandeh ve ark. (2020), farklı kurutma sıcaklıkları 65 °C'de konvektif kuruttukları havuç dilimleri için özgül enerji tüketimi değerini 297.29 MJ kg⁻¹ olarak tespit etmişlerdir. Liu ve ark. (2021), sarımsak dilimleri için birinci ve ikinci aşama baypas hava oranları (0.2, 0.4 ve 0.6) ve hava sıcaklıkları (45, 50 ve 55 °C) için RSM uygulamışlardır. Çalışmada özgül nem çekme oranlarının 1.924 ile 2.232 kg kWh⁻¹ arasında değiştiğini bildirmişlerdir. SMER için tüm faktörlerin önemli (p<0.05) olduğunu ve modelin R² değerinin 0.9999 olduğunu belirtmişlerdir. Beigi (2016a), elmalar için 1 m s⁻¹ hava hızında 50 ve 60 °C hava konvektif kurutma yönteminde termal etkinlik değerlerini sırasıyla %6.57 ve %8.06 olarak belirlemiştir.

Optimizasyon Analizi

Bu çalışmada optimizasyon analizi sonuçları detaylı olarak açıklanmış ve tartışılmıştır. Kontrol faktörlerinin, tepki değişkenlerinin ve birleşik optimizasyonun bireysel arzu edilebilirlik değerleri belirlenmiştir. Kontrol faktörleri (T, ST ve DT) için arzu edilebilirlik fonksiyonu optimizasyon aralığında olacak şekilde düzenlendiğinde değer 1'e eşit olmalıdır (Karaman ve Sağdıç, 2019). Granny Smith ve Red Delicious çeşitleri için SEC ve D_{eff} minimum, SMER, n_{en}, n_{th} maksimum seviyelerde olacak şekilde optimize edilmiştir. Buna göre Granny Smith çeşidi için minimum SEC ve D_{eff} optimizasyon koşulları 50.08 °C, 8.90 mm ve 8.02 saat ve 59.88

°C, 5.03 mm ve 9.89 saat olarak belirlenmiştir. Maksimum SMER, n_{en} ve n_{th} optimizasyon koşulları ise sırasıyla 50.03 °C, 8.94 mm ve 8.26 saat, 50.61 °C, 8.91 mm ve 8.02 saat ve 57.38 °C, 5.26 mm ve 8.00 saat olarak saptanmıştır. Red Delicious çeşidi için minimum SEC ve D_{eff} optimizasyon koşulları 50.02 °C, 8.94 mm ve 9.60 saat ve 50.74 °C, 5.02 mm ve 9.98 saat olarak bulunmuştur. Maksimum SMER, n_{en} ve n_{th} optimizasyon koşulları ise sırasıyla 50.07 °C, 8.62 mm ve 9.48 saat, 50.05 °C, 8.36 mm ve 9.93 saat ve 58.76 °C, 8.99 mm ve 8.01 saat olarak tespit edilmiştir.

Ayrıca, her iki çeşit için çalışılan parametrelerde çoklu yanıt optimizasyonu yapılmış minimum SEC ve D_{eff} , maksimum SMER, n_{en} , n_{th} değerleri dikkate alındığında Granny Smith için optimum koşulların 50.00 °C, 7.31 mm ve 8.00 saat (arzu edilebilirlik=0.801) olacağı sonucuna varılmıştır. Red Delicious için ise optimum koşullar 50.00 °C, 9.00 mm ve 8.00 saat (arzu edilebilirlik=0.847) olarak belirlenmiştir.

Belirsizlik Analizi Sonuçları

Çalışmada nem içeriği, E_c , SEC, SMER, η_{en} , η_{th} ve D_{eff} hesaplamalarındaki ölçülen parametrelerin ve toplam belirsizlik değerleri Çizelge 6'da verilmiştir. Elma dilimlerinin kurutma analizi için belirlenen mevcut belirsizlik değerleri, kabul edilebilir %5'lik sınıra oldukça altında bulunmuştur (Salehi ve ark., 2017).

Çizelge 6. Deneylelerin belirsizlik analiz sonuçları

Parametre	Birim	Değer
Sıcaklık ölçümü	°C	±0.1
Ürün kalınlığı ölçümü	mm	±0.1
Kurutma süresi ölçümü	h	±0.1
Ağırlık ölçümü	g	±0.01
Kütle ölçümü	g	±0.01
Nem içeriği	%	±%0.21
E_c için toplam belirsizlik	kWh	±%4.23
SEC için toplam belirsizlik	kWh kg ⁻¹	±%3.49
SMER için toplam belirsizlik	kg kWh ⁻¹	±%3.27
η_{en} için toplam belirsizlik	%	±%3.27
η_{th} için toplam belirsizlik	%	±%0.24
D_{eff} için toplam belirsizlik	m ² s ⁻¹	±%0.94

Sonuç

Bu çalışmada Granny Smith ve Red Delicious elma çeşitleri konvektif kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Deneyleler, arzu edilebilirlik fonksiyonu kullanılarak Box-Behnken tasarımında 50, 55 ve 60 °C kurutma sıcaklıklarında, 5, 7 ve 9 mm ürün kalınlıklarında, 8, 9 ve 10 saat kurutma sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Wang&Singh modeli deneysel verilere en uygun model olarak belirlenmiştir. SEC, SMER, D_{eff} , n_{en} ve n_{th} özellikleri optimize edilmiş yanıtlardır. Ürün kalınlığı, Granny Smith çeşidine ait termal etkinlik özelliği dışında

tüm tepkiler üzerinde önemli etkilere sahip olmuştur ($p \leq 0.05$). Buna ilaveten sıcaklık değeri her iki çeşitte de efektif nem difüzyonu ve termal etkinlik özellikleri hariç tüm özelliklerde önemli bir etkiye sahip olmuştur ($p \leq 0.05$). Mevcut bulguların, konvektif elma kurutma endüstrisinde sıcaklık, örnek kalınlığı ve kurutma süresine bağlı optimum koşulları sağlamada yardımcı olacağı düşünülmektedir.

Teşekkür

Yapılan bu çalışma etik kurul izni gerektirmemektedir. Makale araştırma ve yayın etiğine uygun olarak hazırlanmıştır. Necati ÇETİN materyal temini, yöntem geliştirilmesi, deneylerin planlanması-kurulması, istatistiksel analizlerin yapılması ve makale yazımı ve düzeltilmesi süreçlerinin tamamında tek başına görev almıştır.

Kaynakça

- Abbaspour-Gilandeh, Y., Kaveh, M. and Aziz, M. 2020. Ultrasonic-microwave and infrared assisted convective drying of carrot: Drying kinetic, quality and energy consumption. *Applied Sciences*, 10(18): 6309.
- Aghbashlo, M., Mobli, H., Rafiee, S. and Madadlou, A. 2012. Energy and exergy analyses of the spray drying process of fish oil microencapsulation. *Biosystems Engineering*, 111: 229–41.
- Akpınar, E. K., Midilli, A. and Biçer, Y. 2003. Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. *Energy Conversion and Management*, 44: 1689–1705.
- Akpınar, E. K. 2010. Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: modelling performance analyses. *Energy Conversion and Management*, 51: 2407-2418.
- Arslan, D. and Özcan, M. M. 2010. Study the effect of sun, oven and microwave drying on quality of onion slices. *LWT-Food Science and Technology*, 43(7): 1121-1127.
- Beigi, M. 2016a. Influence of drying air parameters on mass transfer characteristics of apple slices. *Heat Mass Transfer*, 52: 2213-2221.
- Beigi, M. 2016b. Hot air drying of apple slices: dehydration characteristics and quality assessment. *Heat and Mass Transfer*, 52(8): 1435-1442.
- Box, G. E. P. and Behnken, D. W. 1960. Some new three level designs for the study of quantitative variables. *Technometrics*, 2: 455-475.
- Chayjan, R. A., Kaveh, M., Dibagar, N. and Nejad, M. Z. 2017. Optimization of pistachio nut drying in a fluidized bed dryer with microwave pretreatment applying response surface methodology. *Chemical Product and Process Modeling*, 12: 20160048.

- Contreras, C., Martín-Esparza, M. E., Chiralt, A. and Martínez-Navarrete, N. 2008. Influence of microwave application on convective drying: Effects on drying kinetics, and optical and mechanical properties of apple and strawberry. *Journal of Food Engineering*, 88(1): 55-64.
- Crank, J. 1975. *Mathematics of Diffusion*. 2nd ed; Oxford University Press: London UK p 414.
- Cruz, A. C., Guiné, R. P. and Gonçalves, J. C. 2015. Drying kinetics and product quality for convective drying of apples (cvs. Golden Delicious and Granny Smith). *International Journal of Fruit Science*, 15(1): 54-78.
- Design Expert 1305, 2021. Software for design of experiments Stat-Ease Inc Minneapolis USA.
- Erbay, Z. and Icier, F. 2009. Optimization of hot air drying of olive leaves using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 91(4): 533-541.
- Food and Agriculture Organization (FAO) 2021. FAOSTAT Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) İstatistik Veritabanı. Erişim tarihi: Kasım 2021).
- Giri, S. K. and Prasad, S. 2007. Optimization of microwave-vacuum drying of button mushrooms using response-surface methodology. *Drying Technology*, 25(5), 901-911.
- Halil, T., Tamer, C. E. and Karabacak, A. Ö. 2019. Farklı yöntemlerle kurutulmuş yeşil zeytin katkılı cipslerin kurutma kinetiği ve bazı kalite parametrelerinin incelenmesi. *Bursa Uludag Üniv. Ziraat Fak. Derg.*, 33(1): 123-142.
- Henderson, S. M. and Pabis, S. 1961. Grain drying theory. I. Temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6: 169–174.
- Horuz, E., Bozkurt, H., Karataş, H. and Maskan, M. 2017. Effects of hybrid (microwave-convective) and convective drying on drying kinetics total phenolics antioxidant capacity vitamin C color and rehydration capacity of sour cherries. *Food Chemistry*, 230: 295-305.
- Horuz, E., Bozkurt, H., Karataş, H. and Maskan, M. 2018. Simultaneous application of microwave energy and hot air to whole drying process of apple slices: drying kinetics modeling temperature profile and energy aspect. *Heat Mass Transfer*, 54: 425-436.
- Kaletka, A. and Gornicki, K. 2010. Evaluation of drying models of apple (var McIntosh) dried in a convective dryer. *International Journal Food Science Technology*, 45: 891-898.
- Karaman, K. and Sagdic, O. 2019. Zygosaccharomyces bailii and Z rouxii induced ethanol formation in apple juice supplemented with different natural preservatives: A response surface methodology approach. *Journal of Microbiological Methods*, 163: 105659.
- Kaur, S., Sarkar, B. C., Sharma, H. K. and Singh, C. 2009. Optimization of enzymatic hydrolysis pretreatment conditions for enhanced juice recovery from guava fruit using response surface methodology. *Food Bioprocess Technology*, 2: 96-100.
- Kaya, A., Aydin, O. and Akgun, M. 2011. Drying kinetics and moisture transfer parameters of hazelnut. *Journal Food Process Preservation*, 35: 714–721.
- Koç, B. and Kaymak-Ertekin, F. 2010. Yanıt yüzey yöntemi ve gıda işleme uygulamaları. *Gıda*, 35(1), 1-8.

- Kumar, D., Prasad, S. and Murthy, G. S. 2014. Optimization of microwave-assisted hot air drying conditions of okra using response surface methodology. *Journal of Food Science and Technology*, 51(2): 221-232.
- Li, L., Zhang, M., Bhandari, B. and Zhou, L. 2018. LF-NMR online detection of water dynamics in apple cubes during microwave vacuum drying. *Drying Technology*, 36: 2006-2015.
- Liu, H., Yousaf, K., Yu, Z., Riaz, A., Nyalala, I., Chattha, M. W. A. and Chen, K. 2021. Drying process optimization of garlic slices in closed-loop heat pump drying system by Box-Behnken design. *Journal of Food Processing and Preservation*, e16190.
- Majdi, H., Esfahani, J. A. and Mohebbi, M. 2019. Optimization of convective drying by response surface methodology. *Computers and Electronics in Agriculture*, 156: 574-584.
- Marques, L. G. and Freire, J. T. 2005. Analysis of freeze-drying of tropical fruits. *Drying Technology*, 23: 2169-2184.
- Montgomery, D.C. 2001. Design and analysis of experiments, *John Wiley and Sons*, 427-510.
- Motevali, A., Minaei, S., Banakar, A., Ghobadian, B. and Darvishi, H. 2016. Energy analyses and drying kinetics of chamomile leaves in microwave-convective dryer. *Journal Saudi Society Agricultural Sciences*, 15: 179-187.
- Myers, R. H. and Montgomery D.C. 2002. Response surface methodology process and product optimization using designed experiments, *John Wiley and Sons*, 17-85, 203-303.
- Obajemihi, O. I., Olaoye, J. O., Cheng, J. H., Ojediran, J. O. and Sun, D. W. 2021. Optimization of process conditions for moisture ratio and effective moisture diffusivity of tomato during convective hot-air drying using response surface methodology. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(4): e15287.
- Page, G. 1949. Factors influencing the maximum rates of air-drying shelled corn in thin layer. M.S. Thesis. Purdue University West Lafayette, Indiana: USA.
- Pinar, H., Çetin, N., Ciftci, B., Karaman, K. and Kaplan, M. 2021. Biochemical composition, drying kinetics and chromatic parameters of red pepper as affected by cultivars and drying methods. *Journal of Food Composition and Analysis*, 102: 103976.
- Sahin, A. Z. and Dincer, I. 2002. Graphical determination of drying process and moisture transfer parameters for solids drying. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 45: 3267-3273.
- Salehi, F., Kashaninejad, M. and Jafarianlari, A. 2017. Drying kinetics and characteristics of combined infrared-vacuum drying of button mushroom slices. *Heat Mass Transfer*, 53: 1751-1759.
- Šumić, Z., Vakula, A., Tepić, A., Čakarević, J., Vitas, J. and Pavlić, B. 2016. Modeling and optimization of red currants vacuum drying process by response surface methodology (RSM). *Food Chemistry*, 203: 465-475.
- Taheri-Garavand, A., Karimi, F., Karimi, M., Lotfi, V. and Khoobakht, G. 2018. Hybrid response surface methodology–artificial neural network optimization of drying process of banana slices in a forced convective dryer. *Food Science and Technology International*, 24(4): 277-291.

- Taskin, O. 2020. Evaluation of freeze drying for whole, half cut and puree black chokeberry (*Aronia melanocarpa* L.). *Heat and Mass Transfer*, 56(8): 2503-2513.
- Yaldiz, O., Ertekin, C. and Uzun, H. I. 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of Sultana grapes. *Energy*, 26: 457-465.

