



## Modelling of Rheological Behaviour of Persimmon Puree

Sevim Gürdaş Mazlum<sup>1,a,\*</sup>, Dilan Lodos<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup>Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye

<sup>2</sup>Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye

\*Corresponding author

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Research Article</p> <p>Received : 31.10.2024 Accepted : 05.12.2024</p> <p>Keywords: Persimmon puree Rheology Mizhari-Berk Herschel-Bulkley Türkiye</p>	<p>In this study, the rheological properties of persimmon (<i>Diospyros kaki L.</i>) puree were investigated at various pH (4.0, 5.5 and 7.0), concentrations (15%, 17.5% and 20%), temperatures (25, 50 and 75°C) and shear rates (8.4–28 s<sup>-1</sup>) to determine the rheological model that best describes the flow behaviour of persimmon (<i>Diospyros kaki L.</i>) puree. Experimental data were applied to Power Law, Herschel-Bulkley, Casson and Mizhari-Berk models. In order to evaluate the goodness of fit, three statistical criteria including the coefficient of determination (<math>R^2</math>), reduced chi-squared (<math>\chi^2</math>) and the root mean squared error (RMSE) were used. Herschel-Bulkley and Mizhari-Berk were the models that provided the best fit to the experimental data under all processing conditions of persimmon puree. However, Mizhari-Berk model was the model that best described the flow behavior of persimmon puree with statistical parameter values of <math>R^2 \geq 0.983</math>, <math>RMSE \leq 0.0683</math> and <math>\chi^2 \leq 0.0160</math>. Persimmon puree exhibited a non-Newtonian behavior (<math>n &lt; 1</math>) which was pseudoplastic (shear thinning).</p>

Türk Tarım – Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi, 13(2): 439-445, 2025

## Trabzon Hurma Püresinin Reolojik Davranışının Modellenmesi

MAKALE BİLGİSİ	ÖZ
<p>Araştırma Makalesi</p> <p>Geliş : 31.10.2024 Kabul : 05.12.2024</p> <p>Anahtar Kelimeler: Trabzon hurması püresi Reoloji Mizhari-Berk Herschel-Bulkley Türkiye</p>	<p>Bu çalışmada Trabzon hurması (<i>Diospyros kaki L.</i>) püresinin akış davranışını en iyi tanımlayan reolojik modelin belirlenmesi amacıyla pürenin reolojik özellikleri çeşitli pH'larda (4,0, 5,5 ve 7,0), konsantrasyonlarda (%15, %17,5 ve %20), sıcaklıklarda (25, 50 ve 75°C) ve kayma hızında (8,4–28 s<sup>-1</sup>) araştırılmıştır. Deneysel veriler Power Law, Herschel-Bulkley, Casson ve Mizhari-Berk modellerine uygulanmıştır. Reolojik modellerin akış davranışını açıklamadaki uygunluğunu doğrulamak için belirleme katsayısı (<math>R^2</math>), hata kareleri ortalamasının kare kökü (RMSE) ve indirgenmiş ki- kare (<math>\chi^2</math>) olmak üzere üç istatistiksel ölçüt kullanılmıştır. Herschel-Bulkley ve Mizhari-Berk, hurma püresinin tüm işlem koşullarında deneysel verilere en iyi uyum sağlayan modeller olduğu görülmüştür. Ancak Mizhari-Berk modeli <math>R^2 \geq 0.983</math>, <math>RMSE \leq 0.0683</math> ve <math>\chi^2 \leq 0.0160</math> istatistiksel parametre değerleriyle hurma püresinin akış davranışını en iyi tanımlayan model olmuştur. Trabzon hurması püresi psödoplastik (kayma incelmesi) ve Newtonyen olmayan bir davranış (<math>n &lt; 1</math>) sergilemiştir.</p>

<sup>a</sup> [sgurdas@cumhuriyet.edu.tr](mailto:sgurdas@cumhuriyet.edu.tr)

<sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1166-422X>

<sup>c</sup> [dilanlodos@gmail.com](mailto:dilanlodos@gmail.com)

<sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4802-1153>



This work is licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International License

## Giriş

Meyve püreleri, meyvenin eti, kabuğu ve yenebilen kısımlarından oluşan, yumuşak, pürüzsüz ve yarı katı akışkanlardır. Meyve ve sebzelere bulunduğu sezon dışında da ulaşılabilmesi için püreye işlenmektedir. Ticari olarak elma, armut, şeftali, kayısı, havuç ve domates gibi çok sayıda meyve ve sebze püresi üretilmektedir (Barbieri ve ark., 2018). Püreler zengin bir besin kaynağı olmasının yanı sıra tüketiciler tarafından duyuşal açıdan kabul edilebilir olmalıdır. Bu nedenle pürelerin akış davranışı, ürünün yeme özellikleri açısından önemlidir. Püreler doğrudan tüketilebildiği gibi, birçok üründe bileşen ve ara ürün olarak kullanılmaktadır. Reçeller, marmelatlar, pulplar ve meyve suları gibi gıda ürünlerinin en önemli bileşenlerindedir. Pürelerin reolojik özellikleri, meyvelerin endüstriyel işlenmesinde ve ürünlerin elde edilmesinde önemli rol oynar.

Reoloji, gıda maddelerinin yapısında meydana gelen akış ve deformasyonu inceler. Deformasyon ve akış ise, gıda maddelerinin üretiminden tüketimine kadar her aşamasında ve farklı biçimlerde yer aldığı için gıda sanayi açısından çok önemlidir (Salehi, 2020). Deformasyona ve akmaya sebep olan mekanik özelliklere, reolojik özellikler denir. Gıdayı karakterize etmenin temel bir parçasıdır ve yeni bir gıda ürünü geliştirirken reolojik özelliklerin belirlenmesi gerekir. Çünkü akışkan gıdaların üretim süreçlerinin tasarımı ve proses optimizasyonu (pomplar, boru hatları ve ekipman), ürün geliştirme için ısı ve kütle transfer katsayıları, paketleme ve depolama stratejileri gibi mühendislik parametrelerinin tahmin edilmesine katkı sağlarlar (Diamante ve Umamoto, 2015).

Pürelerin akış davranışı, kayma gerilimi, kayma hızı ve viskozite gibi reolojik parametrelerle karakterize edilir. Meyve püreleri, bileşenleri arasındaki karmaşık etkileşimleri nedeniyle Newtonyen olmayan akış davranışı gösterirler. Bu tür akışkanların kayma gerilimine karşı kayma hızı grafiği doğrusal değildir (Lukhmana ve ark., 2018). Meyve pürelerinin, çözünür şekerler, pektin maddeleri, lifler ve askıda katılar arasındaki etkileşimler, pürelerin Newtonyen olmayan akış davranışına katkıda bulunurlar. Meyve ve sebze pürelerinin yapısı, çözünmeyen (hücre duvarlarının malzemeleri, lifler) ve çözünen (şekerler, mineraller, proteinler ve polisakaritler) bileşenlerden oluşur. Bu oran meyve ve sebzelere göre değişiklik gösterir. Pürelerin reolojik davranışı, pürenin bileşenlerinin oranı, pürenin parçacık şekli ve boyutu gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Bu nedenle her meyve püresinin akış davranışını tanımlayan reolojik model farklıdır. Meyve ve sebze pürelerinin akış davranışını ve deformasyonunu tanımlamak amacıyla, reolojik testlerden elde edilen deneysel veriler reolojik modellere uygulanır (Martínez-Padilla, 2024). Bu modellerden en yaygın kullanılanlar Power Law, Casson, Mizhari-Berk ve Herschel-Bulkley modelleridir. Kıvam katsayısı ( $k$ ), akma gerilimi ( $\tau_0$ ) ve akış davranış indeksi ( $n$ ) gibi modellerin reolojik parametreleri, incelenen pürenin reolojik davranış tipini belirler (Milani ve ark., 2019).

Trabzon hurma meyvesi (*Diospyros kaki L.*), duyuşal özellikleri, biyoaktif fitokimyasalları ve zengin besin içeriği ile birçok ülkede sevilerek tüketilen değerli bir meyvedir. Hurma, biyoaktiviteye sahip birçok makro ve mikro besin kaynağıdır (Kaur ve ark., 2022). Bu bağlamda,

karbonhidratlar, diyet lifleri, mineraller, vitaminler, karotenoidler, organik asitler ve fenolik bileşikler meyvenin ana besin maddelerini oluşturur (Matheus ve ark., 2022; Tardugno ve ark., 2022). Bu besin içerikleriyle antioksidan, anti-inflamatuar, sitotoksik, kardiyoprotektif ve nöroprotektif aktivitelere sahip olduğu bilinmektedir. Yapılan araştırmalar, Trabzon hurma tüketimini çeşitli hastalık risklerinin azalmasıyla ilişkilendirilmiş ve terapötik özellikleri nedeniyle biyoaktif fenolik bileşiklerin katkısı vurgulanmıştır (Tardugno ve ark., 2022). Bu fonksiyonel bileşikler, diyabet, hiperkolesterolemi ve kanser gibi çeşitli rahatsızlıkların önlenmesinde ve tedavisinde önemli bir rol oynamaktadır (Yaqub ve ark., 2016). Hurma meyveleri geleneksel olarak öksürük, hipertansiyon, donma, yanıklar ve kanama gibi birçok tıbbi amaç için de kullanılmıştır (Tardugno ve ark., 2022).

Trabzon hurması mevsimlik bir meyvedir ve her yıl sınırlı bir süre (Ekim-Aralık) taze olarak tüketilir (Murali ve ark., 2023). Olgunlaşmış Trabzon hurmasının raf ömrü kısadır ve çabuk bozulur. Meyvenin besin bileşenlerinin korunması ve daha uzun süre tüketilebilir olması için işlenerek farklı hurma ürünlerine dönüştürülmelidir. Hurma püresi gıda işleme endüstrisi tarafından jelatin, kek, jöle, turta, yoğurt, meyve suyu, sirke, alkol, dondurma, puding, nektar gibi çeşitli gıda ürünlerinin üretiminde kullanılabilir (Murali ve ark., 2023). Meyvenin püreye işlenebilmesi için reolojik özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Meyve pürelerinin reolojik özellikleri üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bunlara, yaban mersini püresi (Nindo ve ark., 2007), macaiba posası (Brasileiro ve ark., 2022), Hint hurması posası (Patel ve ark., 2022) ve jambolan posası (Costa ve ark., 2024) gibi çalışmalar örnek olarak verilebilir. Endüstriyel işleme için gerekli olmasına rağmen, Trabzon hurma püresinin reolojik karakterizasyonu ile ilgili çalışmalara literatürde rastlanmamıştır. Trabzon hurması püresinin akış davranışının ve reolojik özelliklerinin belirlenmesi, püre üretimine önemli katkı sağlayacaktır. Bu nedenle pH, sıcaklık ve konsantrasyon gibi çalışma koşullarında Trabzon hurması püresinin akış davranışını en iyi tanımlayan reolojik modelin belirlenmesi amaçlanmıştır.

## Materyal ve Yöntem

### Materyal

Bu çalışmada kullanılan Trabzon hurmaları Burdur'da bir meyve bahçesinden Ekim ayı sonunda temin edilmiştir. Olgunlaşan meyveler +4°C'de depolanmıştır. Çalışmada kullanılan tüm reaktifler ve çözücüler analitik saflıktadır (Merck, Darmstadt, Almanya).

### Metot

#### Pürenin Hazırlanması

Trabzon hurması meyveleri tam olgunlaşmanın ardından yıkanıp temizlenmiş ve ev tipi bir blender (Braun MQ7045X, Romanya) kullanılarak kabukları ile birlikte püre haline getirilmiştir. Püre 40 gramlık porsiyonlar halinde sterilize edilmiş tek kullanımlık plastik torbalarla paketlenmiştir. Bir kısmı dondurularak -18°C'de, diğer kısmı ise işlenene kadar 4°C'de saklanmıştır (Gürdaş Mazlum ve Lodos, 2025).

Çalışmada kullanılan Trabzon hurma püresi, 100 g numune başına 15, 17,5 ve 20 g çözünmüş katı madde içeren üç standart örnek uygun miktarda deiyonize su ile seyreltilmiştir (Nindo ve ark., 2007). Örneklerin pH ayarı için analitik saflıkta sitrik asit (Merck) ve sodyum hidroksit (Merck) kullanılarak pH 4, 5,5 ve 7'ye ayarlanmıştır. %15, %17,5 ve %20 toplam çözünür katı madde içeren hurma püresinin viskozitesi 25, 50 ve 75°C'de ölçülmüştür. Sıcaklık ekipmana bağlı termostatik bir banyo ile  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  hassasiyetle kontrol edilmiştir. Yüksek sıcaklıkta buharlaşmayı en aza indirmek için numune kabı cam bir kapakla kapatılmıştır.

#### DeneySEL Tasarım

Trabzon hurması püresinin kayma akış davranışı üzerinde bağımsız değişkenlerin etkisini incelemek için Box-Behnken tasarımı kullanılmıştır. Deney tasarımında, pH ( $X_1$ ), konsantrasyon ( $X_2$ ) ve sıcaklık ( $X_3$ ) olmak üzere 3 faktör için sınır değerlere göre merkez nokta hesaplanarak üç seviye belirlenmiştir. Tasarım, her bir faktör, yüksek (1), orta (0) ve düşük (-1) olmak üzere üç seviyeye sahip ve merkez noktanın üç tekrarı içeren 15 deneysel noktadan oluşmaktadır. Üç bağımsız değişkenin kodlanmış ( $x_i$ ) ve bunlara karşılık gelen kodlanmamış ( $X_i$ ) değerleri Çizelge 1'de gösterilmektedir. Deney tasarımını

oluşturmak ve verileri analiz etmek için Minitab Statistical Software Release 13 (Minitab Inc, State College, PA) bilgisayar programı kullanılmıştır.

#### Reolojik Ölçüm

Reolojik özellikler silindirik bir mil ile donatılmış döner bir viskozimetre (DV-II+Pro modeli; Brookfield Engineering Labs. Inc., ABD) kullanılarak kontrollü sıcaklıklarda ölçülmüştür (Brasileiro ve ark., 2022). Sıcaklık, termostatik olarak kontrol edilen bir su banyosu ile sabit tutulmuştur. Trabzon hurması püresinin reolojik ölçümlerinde yapılan ön denemelerde numunenin konsantrasyonuna göre rpm değeri belirlenmiş ve uygun miller (mil no: 5 ve 6) seçilmiştir. Mil seçimi tork değerinin %10-90 arasında olması gerektiği dikkate alınarak yapılmıştır. Ölçümler püre 1 dakika boyunca karıştırıldıktan sonra alınmıştır. Ölçümler 10 saniye aralıklarla kaydedilmiş ve her örnek için sabit kayma hızında 60 veri kaydedilmiştir. Pürenin viskozite ölçümleri, mil hızı 30 rpm'den ( $8,4 \text{ s}^{-1}$ ) kademeli olarak 100 rpm'e ( $28 \text{ s}^{-1}$ ) kadar artırılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm ölçümler için 500 ml'lik beher kullanılmıştır. Her deneysel çalışmadan önce, hurması püresi örnekleri her reolojik testten 1 saat önce oda sıcaklığında ( $25^\circ\text{C}$ ) çözülmuştür (Gürdaş Mazlum ve Lodos, 2025).

Çizelge 1. The Box-Behnken tasarım matrisi

Table 1. The Box-Behnken design matrix

Yöntem	Çalışma sırası (Run)	pH $X_1$ ( $x_1$ )	Konsantrasyon (%w/w) $X_2$ ( $x_2$ )	Sıcaklık ( $^\circ\text{C}$ ) $X_3$ ( $x_3$ )
T1	1	5,5 (0)	15 (-1)	25 (-1)
T2	2	5,5 (0)	20 (+1)	75 (+1)
T3	3	7 (+1)	15 (-1)	50 (0)
T4	4	5,5 (0)	17,5 (0)	50 (0)
T5	5	4 (-1)	17,5 (0)	25 (-1)
T6	6	7 (+1)	17,5 (0)	25 (-1)
T7	7	5,5 (0)	17,5 (0)	50 (0)
T8	8	5,5 (0)	20 (+1)	25 (-1)
T9	9	7 (+1)	20 (+1)	50 (0)
T10	10	4 (-1)	15 (-1)	50 (0)
T11	11	4 (-1)	17,5 (0)	75 (+1)
T12	12	5,5 (0)	15 (-1)	75 (+1)
T13	13	4 (-1)	20 (+1)	50 (0)
T14	14	5,5 (0)	17,5 (0)	50 (0)
T15	15	7 (+1)	17,5 (0)	75 (+1)

Çizelge 2. Trabzon hurması püresinin reolojik davranışının modellenmesinde kullanılan reolojik denklemler ve model parametreleri (Milani ve ark., 2019)

Table 2. Rheological equations and model parameters used to model the rheological behaviour of persimmon puree (Milani et al., 2019)

Model numarası	Model adı	Denklem	Model parametreleri
1	Power law (Ostwald-de-Waele)	$\tau = k\gamma^n$	k:kıvam katsayısı ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ) n:akış davranış indeksi (boyutsuz)
2	Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + k(\gamma)^n$	k: kıvam katsayısı ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ) $\tau_0$ :akma gerilimi (Pa) n:akış davranış indeksi (boyutsuz)
3	Casson	$\tau^{0,5} = \tau_0^{0,5} + k_c\gamma^{0,5}$	$k_c$ : kıvam katsayısı ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^{0,5}$ ) $\tau_0$ :akma gerilimi ( $\text{Pa}^{0,5}$ )
4	Mizhari-Berk	$\tau^{0,5} = \tau_0^{0,5} + k_m\gamma^n$	$k_m$ : kıvam katsayısı ( $\text{Pa}^{0,5}\cdot\text{s}^n$ ) $\tau_0$ :akma gerilimi ( $\text{Pa}^{0,5}$ ) n:akış davranış indeksi (boyutsuz)

$\tau$ :kayma gerilimi (Pa),  $\gamma$ : kayma hızı ( $\text{s}^{-1}$ )

Her ölçüm için yeni bir örnek kullanılmıştır. Trabzon hurması püresinin viskozitesi ve torku, 4,0, 5,5, 7,0 pH aralığında, %15, %17,5, %20 konsantrasyonlarda, 25, 50, 75 °C sıcaklıklarda ve 5 mil hızında (30, 50, 60, 90 ve 100 rpm) ölçülmüştür. Tüm deneyler iki tekrarlı olarak yapılmış ve ortalaması alınmıştır. Ortalama kayma gerilmeleri ve kayma hızları Mitschka (1982) yöntemiyle hesaplanmıştır.

#### Veri analizi ve modelleme

Püreler genellikle Newtonyen olmayan akış davranışı gösterirler. Meyvelerin ve türevlerinin reolojik davranışlarını tanımlamada Güç yasası, Herschel-Bulkley, Casson ve Mizhari-Berk en yaygın kullanılan reolojik modellerdir (Kechinski ve ark., 2011). Bu nedenle Trabzon hurması püresinin akış davranışını tanımlamak için bu dört model seçilmiş ve modellerin denklemleri ve parametreleri Çizelge 2’de verilmiştir.

Deneysel verilere en iyi uyum sağlayan modeli belirlemek için pürenin deneysel kayma gerilimi-kayma hızı verileri Güç yasası, Herschel-Bulkley, Casson ve Mizhari-Berk modellerine uygulanmıştır. Tüm modellerin parametre tahminleri doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizleri ile  $p < 0,05$  anlamlılık düzeyinde hesaplanmıştır. Doğrusal olmayan en küçük kareler regresyon yöntemi Microsoft Excel 2016 (Microsoft Corporation, ABD) çözücü aracı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Mustapha ve ark., 2023).

Uyumun iyiliğini değerlendirmek için belirleme katsayısı ( $R^2$ ), hata kareleri ortalamasının kare kökü (RMSE) ve indirgenmiş ki- kare ( $\chi^2$ ) olmak üzere üç istatistiksel ölçüt kullanılmıştır. Reolojik modellerin akış davranışını açıklamadaki uygunluğunu doğrulamak için indirgenmiş ki-kare ( $\chi^2$ ) ve hata kareleri ortalamasının kare kökü (RMSE) gibi hata analizi yöntemleri kullanılmış ve belirleme katsayısı ( $R^2$ ) ile karşılaştırılmıştır (Mustapha ve ark., 2023). Çünkü reoloji denklemlerinin doğrusal biçimleri ile deneysel veriler arasındaki uygunluğu temsil ettiği için,  $R^2$  tek başına en iyi reolojik modelin seçiminde yeterli olmayabilir. Deneysel veriler ile modelden elde edilen veriler arasındaki fark  $\chi^2$  ile ölçülür (Mustapha ve

ark., 2023).  $R^2$ ’nin en yüksek değerleri, RMSE ve  $\chi^2$ ’nin en düşük değerleri, en iyi uyumu gösteren modeli belirlemek için kullanılmıştır.  $R^2$ , RMSE ve  $\chi^2$  sırasıyla 1-3 denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır (Milani ve ark., 2019; Tavakolipour ve ark., 2020).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\tau_{\text{exp},i} - \tau_{\text{pre},i})^2}{\sum_{i=1}^N (\tau_{\text{exp},i} - \bar{\tau}_{\text{exp},i})^2} \quad (1)$$

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

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\tau_{\text{exp},i} - \tau_{\text{pre},i})^2}{N-m} \quad (3)$$

burada  $\tau_{\text{exp},i}$  deneysel kayma gerilimi,  $\tau_{\text{pre},i}$  tahmin edilen kayma gerilimi,  $\bar{\tau}_{\text{exp},i}$  deneysel kayma geriliminin ortalaması,  $N$  gözlem sayısı ve  $m$  modelin sabitleri.

## Bulgular ve Tartışma

### Matematiksel Modelleme

Trabzon hurması püresinin reolojik modelinin belirlenmesi amacıyla oluşturulan pH, konsantrasyon ve sıcaklık olmak üzere 3 faktör ve üç seviye içeren Box-Behnken deney tasarımı Tablo 1’de gösterilmektedir. Pürenin viskozite ölçümleri  $8,4 \text{ s}^{-1}$ ’den kademeli olarak  $28 \text{ s}^{-1}$  kadar artırılarak gerçekleştirilmiştir. Trabzon hurması püresi için 4,0, 5,5, 7,0 pH, %15, %17,5, %20 konsantrasyon ve 25, 50, 75°C sıcaklıklarda kayma gerilimi ve kayma hızı verileri toplanmıştır. Ölçülen veriler, çalışılan pH, sıcaklık ve konsantrasyon aralıklarında Trabzon hurması püresinin akış davranışını en iyi tanımlayan modeli belirlemek için Power Law, Herschel-Bulkley, Casson ve Mizhari-Berk olmak üzere dört modele uygulanmıştır (Çizelge 2). Parametre tahmininin sonuçları Power Law ve Herschel-Bulkley modelleri için Çizelge 3’de, Casson ve Mizhari-Berk modelleri için Çizelge 4’de verilmiştir.

Çizelge 3. Power law ve Herschel-Bulkley modelleri için parametre tahmini sonuçları

Table 3. Results for parameters estimation for Power law and Herschel-Bulkley models

Yöntem	Power law					Herschel-Bulkley					
	K Pa s <sup>n</sup>	n	R <sup>2</sup>	RMSE	$\chi^2$	K Pa s <sup>n</sup>	n	$\tau_0$ Pa	R <sup>2</sup>	RMSE	$\chi^2$
T1	3,869	0,723	0,989	0,537	0,481	3,046	0,779	2,224	0,997	0,499	0,624
T2	3,574	0,726	0,937	1,091	1,983	2,939	0,771	1,748	0,984	1,079	2,916
T3	3,794	0,627	0,997	0,189	0,059	2,306	0,741	3,391	0,999	0,129	0,042
T4	3,430	0,642	0,994	0,279	0,129	2,798	0,687	1,398	0,998	0,276	0,189
T5	5,064	0,775	0,988	0,942	1,480	4,416	0,808	1,849	0,997	0,866	1,876
T6	9,579	0,644	0,922	2,741	12,526	8,295	0,675	3,013	0,972	2,673	17,867
T7	3,502	0,566	0,929	0,544	0,494	2,219	0,668	2,592	0,983	0,541	0,732
T8	14,487	0,397	0,903	1,356	3,064	10,834	0,452	5,565	0,971	1,289	4,159
T9	13,574	0,285	0,821	0,875	1,275	8,474	0,365	6,540	0,947	0,872	1,899
T10	6,640	0,281	0,878	0,308	0,159	4,032	0,364	3,337	0,967	0,325	0,265
T11	2,887	0,771	0,997	0,246	0,101	2,186	0,838	2,009	0,999	0,179	0,080
T12	3,125	0,700	0,975	0,574	0,549	2,682	0,736	1,088	0,993	0,573	0,822
T13	7,670	0,586	0,959	1,177	2,308	5,631	0,652	4,436	0,988	1,101	3,029
T14	4,778	0,501	0,726	1,119	2,089	1,374	0,783	6,898	0,935	1,099	3,017
T15	4,313	0,775	0,991	0,684	0,781	3,665	0,815	1,837	0,997	0,659	1,086

Çizelge 4 Casson ve Mizrahi-Berk modelleri için parametre tahmini sonuçları  
Table 4 Results for parameters estimation for Casson and Mizrahi-Berk models

Yöntem	Casson					Mizhari-Berk					
	$k_c Pa s^{0,5}$	$\tau_0 Pa^{0,5}$	$R^2$	RMSE	$\chi^2$	$k_m Pa^{0,5} s^n$	N	$\tau_0 Pa^{0,5}$	$R^2$	RMSE	$\chi^2$
T1	0,964	1,487	0,996	0,044	0,003	1,176	0,458	1,162	0,999	0,044	0,005
T2	0,985	1,239	0,992	0,111	0,021	1,121	0,461	1,132	0,988	0,089	0,020
T3	0,729	1,707	0,999	0,018	0,001	1,070	0,420	1,198	0,999	0,013	0,001
T4	0,700	1,700	0,995	0,361	0,217	1,010	0,431	1,157	0,999	0,028	0,002
T5	1,238	1,617	0,995	0,059	0,006	1,419	0,474	1,99	0,997	0,063	0,009
T6	1,111	3,058	0,963	0,174	0,050	1,812	0,411	1,875	0,972	0,172	0,077
T7	0,621	1,617	0,996	0,078	0,012	0,996	0,391	1,144	0,999	0,058	0,008
T8	0,623	4,066	0,968	0,080	0,011	2,268	0,268	1,831	0,969	0,098	0,024
T9	0,390	3,886	0,914	0,082	0,011	2,094	0,209	1,732	0,946	0,080	0,016
T10	0,286	2,650	0,944	0,056	0,005	1,257	0,228	1,434	0,966	0,044	0,006
T11	0,944	1,157	0,999	0,871	1,265	1,003	0,487	1,062	1	0,015	0,001
T12	0,843	1,288	0,993	0,069	0,008	0,975	0,462	1,136	0,993	0,059	0,008
T13	0,872	2,712	0,984	0,079	0,011	1,688	0,375	1,454	0,987	0,087	0,019
T14	0,571	2,085	0,914	0,129	0,028	1,174	0,350	1,268	0,934	0,125	0,039
T15	1,185	1,332	0,997	0,053	0,005	1,277	0,481	1,215	0,997	0,049	0,006

Çizelge 5 Modellerin istatistiksel parametrelerinin ortalama ve kritik (minimum ve maksimum) değerleri (Çizelge 3 ve Çizelge 4 verilerine dayanmaktadır) (Kechinski ve ark., 2011)

Table 5 Average and critical (minimum and maximum) values of the statistical indicators for the different models (based on data of Table 3 and Table 4)

Modellerin istatistiksel parametrelerinin ortalama ve kritik değerleri		Power law	Casson	Herschel-Bulkley	Mizhari-Berk
$R^2$	Average	0,934	0,977	0,982	0,983
	Minimum	0,726	0,914	0,935	0,934
$\chi^2$	Average	1,832	0,110	2,574	0,016
	Maximum	12,526	1,265	17,867	0,077
RMSE	Average	0,844	0,151	0,811	0,068
	Maximum	2,741	0,871	2,673	0,172

Trabzon hurması püresinin çeşitli pH, konsantrasyon ve sıcaklıklardaki kayma gerilimi ve kayma hızı arasındaki ilişki için her modelde  $R^2$ ,  $RMSE$  ve  $\chi^2$  istatistiksel parametreleri 1-3 denklemleri ile hesaplanmış ve Çizelge 3 ve 4'de verilmiştir. Modellerin yeterliliği değerlendirilirken  $R^2$ 'nin en yüksek değerleri,  $RMSE$  ve  $\chi^2$ 'nin için en düşük değerleri kullanılmıştır. Modellerin yeterliliğini karşılaştırmak amacıyla, her bir model için istatistiksel göstergelerin (belirleme katsayısı, hata kareleri ortalamasının kare kökü ve ki-kare) ortalama ve kritik (minimum veya maksimum) değerleri hesaplanmış ve Çizelge 5'de verilmiştir. Bu göstergelerin ortalaması ve minimum ve maksimum değerleri, incelenen tüm modelin genel uyum yeteneği hakkında önemli bilgiler verir (Kechinski ve ark., 2011). Modeller incelenirken, verilerin tamamını temsil eden istatistiksel parametrelerin ortalaması dikkate alınmıştır.

Power Law ve Casson modelleri incelendiğinde ortalama  $R^2$  değeri en yüksek, ortalama  $RMSE$  ve  $\chi^2$  değerleri en düşük olan Casson modeli deneysel verilere daha iyi uyum göstermiştir (Çizelge 5). Kechinski ve ark., (2011) yaptıkları çalışmada yaban mersini püresi için 2 parametrelili Power Law ve Casson modellerinin kıyaslanmasında Casson modelinin daha iyi uyum sağladığını bildirmişlerdir. Power Law modeli, konsantre meyve ve sebze suları, meyve posaları ve püre tipi gıdaların akma gerilimi olmadan akış davranışlarını karakterize etmek için en yaygın kullanılan modeldir. Power Law ve Casson modelleri, köri yaprağı püresi

(Meher ve ark., 2018), Fars üzüm pekmezi (Tavakolipour ve ark., 2020), üzüm pekmezi Milani ve ark., 2019) ve Hint hurması pulpunun (Patel ve ark., 2022) akış davranışını tanımlayan en iyi modeller olarak gösterilmiştir.

Herschel-Bulkley modeli  $R^2 \geq 0,982$  ve  $RMSE \leq 0,811$  ile deneysel verilere iyi uyum göstermiştir. Herschel-Bulkley ve Mizhari-Berk modelleri incelendiğinde ortalama  $R^2$  değeri her iki modelde birbirine yakındı ancak, ortalama  $RMSE$  ve  $\chi^2$  değerleri en düşük olan Mizhari-Berk modeli deneysel verilere daha iyi uyum göstermiştir (Çizelge 5). Çünkü Mizhari-Berk modelinin  $\chi^2$  değeri Herschel-Bulkley modelinin  $\chi^2$  değerinden daha düşük bir değere sahiptir. Bu nedenle Trabzon hurması püresinin deneysel verilerine en iyi uyumu sağlayan Mizhari-Berk modelidir. Mizrahi-Berk tarafından önerilen reolojik model, meyve posaları, meyve suları ve pürelerin akış eğrileriyle iyi bir uyum sağlar. Bu yazarlar, modellerini, konsantre bir portakal suyundaki ve diğer psödoplastik çözücülerdeki parçacıkların etkileşimini temsil etmek için değiştirilmiş bir Casson modeli olarak geliştirmişlerdir (Santos ve ark., 2016).

İki parametrelili Casson modeli ile üç parametrelili Mizhari-Berk modeli karşılaştırıldığında deneysel verilere en iyi uyumu gösteren modelin Mizhari-Berk olduğu görülmüştür. Mizhari-Berk modeli  $R^2 \geq 0,983$ ,  $RMSE \leq 0,068$  ve  $\chi^2 \leq 0,016$  istatistiksel parametreleriyle incelenen reolojik modeller arasında hurma püresinin akış davranışını en iyi tanımlayan model olduğu belirlenmiştir

(Çizelge 5). Bazı araştırmacılar, malay elma suyu (Santos ve ark., 2016) vişne püresi (Lukhmana ve ark., 2018), makaiba pulpu (Brasileiro ve ark.,2022) ve jambolan pulpu (Costa ve ark.,2024) gibi meyve ürünlerinin akış davranışlarının Herschel-Bulkley ve Mizrahi-Berk modelleri tarafından tanımlandığını bildirmişlerdir.

Trabzon hurması püresi, çözünür şekerler, organik asitler, çözünür pektinler, vitaminler, mineraller, karotenoidler ve fenolik bileşikler gibi içerdiği bileşenler arasındaki karmaşık etkileşimler sonucu Newtonyen olmayan bir sıvı gibi davrandığını göstermiş ve aynı zamanda akma geriliminin varlığına işaret etmiştir (Matheus ve ark., 2022). Bu durum Casson, Herschel-Bulkley ve Mizrahi-Berk gibi akma gerilim içeren modellerin istatistiksel parametrelerinden görülmektedir. Casson, Herschel-Bulkley ve Mizrahi-Berk modellerinin ortalama  $R^2$  ve  $RMSE$  değerleri sırasıyla 0,977, 0,982 ve 0,983 olarak ve 0,151, 0,811 ve 0,0683 olarak belirlenmiştir. Deneysel verilere iyi uyum sağlayan modeller, ortalama  $R^2$  değerine göre Mizrahi-Berk>Herschel-Bulkley>Casson şeklinde sıralanabilir. Akma gerilimi, pürenin akışını başlatmak için gereken minimum kayma gerilimidir. Akma geriliminin altındaki gerilimde, malzeme elastik bir şekilde deforme olur ve elastik bir katı gibi davranır; akma geriliminin üstünde ise akmaya başlar ve viskoz bir sıvı gibi davranır (Augusto ve ark., 2012).

Power Law, Herschel-Bulkley ve Mizrahi-Berk modellerinin akış davranışı indeksi ( $n$ )  $0 < n < 1$  aralığında bulunmuştur. Püresinin akış davranışı indeksinin  $n < 1$  olması psödoplastik (kayma inceltme) davranışa işaret eder. Trabzon hurması püresinin kayma hızı ve kayma gerilimi arasındaki ilişkinin de Newtonyen olmadığını gösterir. Benzer bulgular Costa ve ark., (2024) tarafından 10, 20, 30, 50 ve 70°C sıcaklıklardaki jambolan pulpu için bildirilmiştir. Literatürde, yaban mersini püresi (Kechinski ve ark., 2011), siriguela pulpu (Augusto ve ark., 2012), hurma şurubu (Gabsi ve ark., 2013), açai pulpu (Costa ve ark., 2018) gibi diğer meyvelerde de kayma inceltme davranışı tanımlanmıştır. Akış davranış indeksinin ( $n$ ) farklı değerleri akışkan davranışını gösterir. Akışkanlar, akış davranışı indeksi,  $n=1$  ise Newtonyen,  $n > 1$  ise dilatan ve  $n < 1$  ise psödoplastik (kayma inceltme) olarak tanımlanır (Martinez-Padilla, 2024). Çoğu meyve püresi kayma inceltme davranışı gösterir ( $0 < n < 1$ ), kayma sırasında oluşan hidrodinamik kuvvetler nedeniyle bir gıdadaki yapısal birimlerin bozulmasının bir göstergesi olarak kabul edilmektedir (Nindo ve ark., 2007). Mevcut çalışmada Mizrahi-Berk modelinin akış davranış indeksi 0,209-0,487 arasında değerler almıştır. Benzer bulgular malay elma suyu konsantreleri için  $n < 0,5$  olduğu bildirilmiştir (Santos ve ark., 2016).

## Sonuç ve Öneriler

Trabzon hurması püresinin reolojik özellikleri farklı pH, konsantrasyon, sıcaklık ve kayma hızında ( $8,4-28 \text{ s}^{-1}$ ) araştırılmıştır. Trabzon hurması püresinin akış davranışını en iyi tanımlayan reolojik modelin belirlenmesi amacıyla deneysel veriler Power Law, Herschel-Bulkley, Casson ve Mizrahi-Berk modellerine uygulanmıştır. Reolojik modellerin uygunluğunu doğrulamak için belirleme katsayısı ( $R^2$ ), indirgenmiş ki-kare ( $\chi^2$ ) ve hata kareleri ortalamasının kare kökü ( $RMSE$ ) gibi istatistiksel parametreler kullanılmıştır.

Herschel-Bulkley ve Mizrahi-Berk modelleri, Trabzon hurması püresinin tüm işlem koşullarında deneysel verilerine iyi uyumu sağlamıştır. Ancak Mizrahi-Berk modeli  $R^2 \geq 0,983$ ,  $RMSE \leq 0,0683$  ve  $\chi^2 \leq 0,0160$  istatistiksel parametreleriyle incelenen reolojik modeller arasında hurma püresinin akış davranışını en iyi tanımlayan model olmuştur. Power Law, Herschel-Bulkley ve Mizrahi-Berk modellerinin akış davranış indeksi değerlerinin  $n < 1$  olması Trabzon hurması püresinin Newtonyen olmayan davranışa sahip, psödoplastik (kayma inceltme) bir akışkan olduğunu göstermiştir. Bu çalışmanın bulguları, Trabzon hurması püresinin reolojisi hakkında daha fazla araştırma yapılabilmesi için yararlı olabilir. Ayrıca gıda işleme endüstrilerinin hurması püresi ve benzer ürünler üretmesine önemli ölçüde katkı sağlayacaktır.

## Beyanlar

Bu araştırma için etik onayı gerekmemektedir  
Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

## Kaynaklar

- Augusto, P.E., Cristianini, M., & Ibarz, A., (2012). Effect of temperature on dynamic and steady-state shear rheological properties of siriguela (*Spondias purpurea* L.) pulp. *Journal of Food Engineering*, 108(2), 283-289. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.08.015>
- Barbieri, S.F., Petkowicz, C.L.O., De Godoy, R.C.B., De Azeredo, H.C.M., Franco, C.R.C., & Silveira, J.L.M. (2018). Pulp and Jam of Gabiroba (*Campomanesia xanthocarpa* Berg): Characterization and Rheological Properties. *Food Chemistry*, 263, 292-299. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.05.004>
- Brasileiro, J.L.O., De Figueiredo, R.M.E., de Queiroz, A.J.M., & Feitosa, R.M. (2022). Modelling of rheological behaviour of macaiba pulp at different temperatures. *Rev. bras. eng. agric. ambient.* 26(3) <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n3p198-203>
- Costa, B.S.D., Leite, T.S., Cristianini, M., & Schimdt, F.L., (2024). Effect of temperature on dynamic and steady-state shear rheological properties of Jambolan (*Syzygium cumini*) pulp. *Measurement: Food*, 14, 100156. <https://doi.org/10.1016/j.meafoo.2024.100156>
- Costa, H.C.B., Arouca, F.O., & Silva, D.O. (2018). Study of rheological properties of açai berry pulp: an analysis of its time-dependent behavior and the effect of temperature. *Journal of Biological Physics*, 4, 557-577. <https://doi.org/10.1007/s10867-018-9506-7>
- Diamante, L. & M. Umamoto. (2015). Rheological Properties of Fruits and Vegetables: A Review. *International Journal of Food Properties*, 18(6), 1191-1210. <https://doi.org/10.1080/10942912.2014.898653>
- Gabsi, K., Trigui, M., Barrington, S., Helal, A.N., & Taherian, A.R. (2013). Evaluation of rheological properties of date syrup. *Journal of Food Engineering*, 117(1), 165-172. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.02.017>
- González-Montemayor, A.M., Solanilla-Duque, J.F., Flores-Gallegos, A.C., Serrato-Villegas, L.E., Morales-Castro, J., González-Herrera, S.M., & Rodríguez-Herrera, R. (2022). Temperature effect on sensory attributes, thermal and rheological properties of concentrated aguamiel syrups of two Agave species. *Measurement: Food*, 7,100041. <https://doi.org/10.1016/j.meafoo.2022.100041>

- Gürdaş Mazlum, S., & Lodos, D. (2025). Investigation of the rheological properties of persimmon puree by using response surface methodology. *Quality Assurance And Safety Of Crops And Foods*, 17 (1), 57-74. <https://doi.org/10.15586/qas.v17i1.1519>.
- Kechinski, K. P., Schumacher, A. B., Marczak, L. D., Tessaro, I. C., & Cardozo, N. S. (2011). Rheological behavior of blueberry (*Vaccinium ashei*) purees containing xanthan gum and fructose as ingredients. *Food Hydrocolloids*, 25(3), 299-306. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.06.007>
- Kaur, N., Kumari, A., Agarwal, A., Sabharwal, M. & Dipti, S. (2022). Utilisation of *Diospyros kaki L.* (persimmon) as a functional ingredient to produce functional foods: a review. *Nutrition & Food Science*, 52(7), 1083-1099. <https://doi.org/10.1108/NFS-11-2021-0337>
- Lukhmana, N., Kong, F., Kerr, W., & Singh, R. (2018). Rheological and structural properties of tart cherry puree as affected by particle size reduction. *LWT*, 90:650-657. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.11.032>
- Martinez-Padilla, L.P. (2024). Rheology of liquid foods under shear flow conditions: Recently used models. *Journal of Texture Studies* 55(1):e12802. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12802>
- Matheus, J.R.V., Andrade, C.J.D., Miyahira, R.F., & Fai, A.E.C. (2022). Persimmon (*Diospyros Kaki L.*): Chemical properties, bioactive compounds and potential use in the development of new products—a review. *Food Reviews International*, 38, 384-401. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1733597>
- Meher, J., Keshav, A., & Mazumdar, B. (2018). Effect of blanching and thermal preservation on rheology of curry leaf puree. *Food Measure*, 12, 105–117 <https://doi.org/10.1007/s11694-017-9621-3>
- Milani, J. M., Naghavi, A., Golkar, A., & Khosravi, T. (2019). Rheological behavior of different phases of grape molasses after storage: Effect of concentration and temperature. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(8), e14013. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14013>
- Mitschka, P. (1982). Simple conversion of Brookfield R.V.T. readings into viscosity functions. *Rheological Acta*, 21, 207-209.
- Murali, P., Shams, R., & Dar, A.H. (2023). Insights on nutritional profile, nutraceutical components, pharmacological potential, and trending utilization of persimmon cultivars: A review. *Food Chemistry Advances*, 3:100431. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100431>
- Mustapha, L., Yusuff, A., & Dim, P. (2023). RSM optimization studies for cadmium ions adsorption onto pristine and acid-modified kaolinite clay. *Heliyon*, 9(8), e18634. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18634>
- Nindo, C., Tang, J., Powers, J., & Takhar, P. (2007). Rheological properties of blueberry puree for processing applications. *LWT-Food Science and Technology*, 40(2), 292-299. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.10.003>
- Patel, G., Murakonda, S., & Dwivedi, M. (2022). Steady and dynamic shear rheology of Indian Jujube (*Ziziphus mauritiana Lam.*) fruit pulp with physicochemical, textural and thermal properties of the fruit. *Measurement: Food*, 5, 100023. <https://doi.org/10.1016/j.meafoo.2022.100023>
- Salehi, F. (2020). Physicochemical characteristics and rheological behaviour of some fruit juices and their concentrates. *Food Measure* 14, 2472–2488 <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00495-0>
- Santos, P.H., Silva, L.H.M., Rodrigues, A.M.C., & Souza, J.A.R. (2016). Influence of temperature, concentration and shear rate on the rheological behavior of malay apple (*Syzygium malaccense*) juice. *Braz. J. Food Technol.*, 19, e2015009, <https://doi.org/10.1590/1981-6723.0915>
- Tardugno, R., Gervasi, T., Nava, V., Cammilleri, G., Ferrantelli, V., & Cicero, N. (2022). Nutritional and mineral composition of persimmon fruits (*Diospyros kaki L.*) from Central and Southern Italy. *Natural Product Research* 36, 5168-5173. DOI: 10.1080/14786419.2021.1921768
- Tavakolipour, H., Mokhtarian, M., & Kalbasi-Ashtari, A., (2020). Rheological modeling and activation energy of Persian grape molasses. *Journal of Food Process Engineering*, 43(12), e13547. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13547>
- Yaqub, S., Farooq, U., Shafi, A., Akram, K., Murtaza, M. A., Kausar, T., & Siddique, F. (2015). Chemistry and Functionality of Bioactive Compounds Present in Persimmon. *Journal of Chemistry*, 2016(1), 3424025. <https://doi.org/10.1155/2016/3424025>