

اثر دما و غلظت بر رفتار رئولوژیکی کنسانتره توت سفید

اکرم آریان فر^{1*}، رویا امیری قندشینی²

1- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد قوچان، دانشگاه آزاد اسلامی، قوچان، ایران

2- گروه علوم و صنایع غذایی، واحد قوچان، دانشگاه آزاد اسلامی، قوچان، ایران

تاریخ پذیرش: 1397/02/25

تاریخ دریافت: 96/04/10

چکیده

آگاهی از رفتار رئولوژیکی عصاره میوه‌ها برای کنترل کیفیت، کنترل فرآیند و کاربردهای مهندسی حائز اهمیت است. دما و غلظت پرکاربردترین عوامل مورد استفاده برای مطالعه رفتار رئولوژیکی مواد غذایی هستند. در پژوهش حاضر، اثر دما و غلظت روی رفتار رئولوژیکی کنسانتره توت سفید با استفاده از رئومتر در محدوده دمایی 25 تا 45 درجه سانتی‌گراد و بریکس 45 تا 65 و سرعت‌های برشی 0 تا 200 s^{-1} مورد بررسی قرار گرفت. از معادله آرنیوس برای تعیین اثر دما روی ویسکوزیته کنسانتره توت سفید استفاده شد و مقادیر انرژی فعال‌سازی محاسبه گردید. علاوه بر این، اثر غلظت روی ویسکوزیته توسط روابط قانون توان و نمایی و اثر ترکیبی دما و غلظت روی ویسکوزیته کنسانتره توت سفید توسط ترکیب کردن معادله آرنیوس با قانون توان یا رابطه نمایی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های کنسانتره توت سفید دارای رفتار نیوتنی بودند (شاخص رفتار جریانی بین 0/98 تا 1) و مدل قانون توان به عنوان بهترین مدل رئولوژیکی برازش شده با داده‌های آزمایشی انتخاب شد ($R^2 \geq 0/999$). وابستگی ویسکوزیته به دما و غلظت به خوبی توسط معادله آرنیوس ($R^2 \geq 0/99$) و رابطه نمایی ($R^2 \geq 0/95$) توصیف شد. مقادیر انرژی فعال‌سازی بسته به غلظت‌ها از 22/97 تا 47/14 کیلوژول بر مول متغیر بود. علاوه بر این، اثر ترکیبی دما و غلظت روی ویسکوزیته کنسانتره توت سفید به خوبی توسط مدل نمایی ($R^2 \geq 0/95$) توصیف شد. به طور کلی، نتایج پژوهش حاضر می‌تواند در فرآوری کنسانتره توت سفید برای آگاهی اولیه از خواص رئولوژیکی آن مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: رفتار رئولوژیکی، قانون توان، کنسانتره توت سفید، معادله آرنیوس، ویسکوزیته

*مسئول مکاتبات: a_aria_1443@yahoo.com

1- مقدمه

توت از خانواده Moraceae و جنس Morus بوده و دارای گونه‌های سفید، سرخ و سیاه است. توت سفید بومی شرق آسیا بوده و در مناطق وسیعی از شمال هند، پاکستان و ایران گسترده شده است (1). ترکیبات فنلی موجود در توت سفید دارای طیف وسیعی از فعالیت‌های بیوشیمیایی نظیر آنتی‌اکسیدانی، آنتی‌موتازنی و خواص ضدسرطانی می‌باشند (1). تغلیظ حرارتی یکی از روش‌های نگهداری و استفاده طولانی‌مدت از عصاره توت سفید است. عصاره توت سفید یک منبع غنی از املاح و ترکیبات قندی است. برای اهداف فرآوری آب میوه‌ها یا عصاره‌های غذایی، بررسی خواص رئولوژیکی جهت ارزیابی کیفیت، درک ساختار محصول، طراحی تجهیزات فرآیند، اهداف حمل و نقل، تعیین ظرفیت پمپ و توان مصرفی بسیار مهم می‌باشد (2). رفتار مواد غذایی تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند غلظت یا درصد مواد جامد محلول، دمای مورد آزمون، ترکیبات تشکیل‌دهنده ماده غذایی و اندازه ذرات یا قطرات فاز پراکنده قرار می‌گیرد (3 و 4). از بین این عوامل، دما و غلظت جزء پرکاربردترین عوامل مورد استفاده برای بررسی رفتار رئولوژیکی مواد غذایی هستند (2). Belibagli و Dalgic (5) گزارش نمودند که آب آلبالو و کنسانتره آلبالو در شرایط دما (5 تا 50 درجه سانتی‌گراد) و غلظت (40 تا 75 درجه بریکس) مورد استفاده دارای رفتار نیوتنی بودند. به طور مشابه، در مطالعه‌ای جدید نشان داده شد که رفتار رئولوژیکی کنسانتره ازگیل وحشی در شرایط مورد مطالعه (در دماهای 20 تا 70 درجه سانتی‌گراد و غلظت‌های 14 تا 56 درجه بریکس) از نوع نیوتنی بود (6). اثر دما و غلظت (به طور جداگانه یا ترکیبی) روی پارامترهای رئولوژیکی مواد غذایی مایع را می‌توان مدل‌سازی کرد. در این ارتباط، رابطه آرنیوس معمولاً برای بررسی اثر دما روی ضریب قوام یا ویسکوزیته مواد غذایی مایع به کار

می‌رود. Altan و Maskan (7) گزارش کردند که اثر دما (10 تا 55 درجه سانتی‌گراد) روی ویسکوزیته آب انار و کنسانتره انار در غلظت‌های مختلف (5/17 تا 75 درجه بریکس) به خوبی توسط مدل آرنیوس ارزیابی شد. به طور مشابه، Belibagli و Dalgic (5) نشان دادند که رابطه آرنیوس به خوبی اثر دما (5 تا 50 درجه سانتی‌گراد) بر رفتار رئولوژیکی آب آلبالو و کنسانتره آلبالو در غلظت‌های مختلف (40 تا 75 درجه بریکس) را توصیف نمود ($R^2 > 0/97$). نتیجه مشابهی توسط توکلی‌پور و کلباسی اشتری (8) برای کنسانتره انگور (در دماهای 25 تا 65 درجه سانتی‌گراد و غلظت‌های 35 تا 76 درجه بریکس)، صالحی و کاشانی‌نژاد (6) برای رفتار رئولوژیکی کنسانتره ازگیل وحشی (در دماهای 20 تا 70 درجه سانتی‌گراد و غلظت‌های 14 تا 56 درجه بریکس) ($R^2 > 0/97$) و Barbana و El-Omri (9) برای کنسانتره گوجه‌فرنگی (در دماهای 20 تا 60 درجه سانتی‌گراد و غلظت‌های 9/7 تا 26/8 درجه بریکس) گزارش شد. از طرف دیگر، اثر غلظت روی پارامترهای رئولوژیکی مواد غذایی معمولاً توسط روابط نوع قانون توان و نمایی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (10). در این ارتباط، صالحی و کاشانی‌نژاد (6) گزارش نمودند که رابطه نوع قانون توان به خوبی اثر غلظت‌های مختلف کنسانتره ازگیل وحشی (14 تا 56 درجه بریکس) روی ویسکوزیته را توصیف نمود. نتایج مشابهی توسط کاراژیان و همکاران (11) برای عصاره شیرین بیان (در دماهای 10 تا 70 درجه سانتی‌گراد و غلظت‌های 5 تا 50 درجه بریکس)، Altan و Maskan (7) برای آب انار و کنسانتره انار و Belibagli و Dalgic (5) برای آب آلبالو و کنسانتره آلبالو گزارش شد. علاوه بر این، برای کاربردهای مهندسی، دستیابی به رابطه‌ای که بتواند به طور همزمان اثر ترکیبی دما و غلظت روی پارامترهای رئولوژیکی مواد غذایی مایع را نشان دهد، بسیار حائز اهمیت است. این کار معمولاً با ترکیب کردن مدل آرنیوس با مدل نوع نمایی یا مدل قانون توان انجام

شدند. مقدار pH کنسانتره توت سفید توسط دستگاه pH متر (مدل Knick-766 ساخت کشور آلمان) اندازه‌گیری شد. همچنین، میزان بریکس (درصد مواد جامد محلول) نمونه توسط دستگاه رفاکومتر دیجیتالی (مدل CETI, ABBE, Belgium) اندازه‌گیری شد.

2-3- اندازه‌گیری خواص رئولوژیکی

برای تعیین داده‌های تنش برشی در مقابل سرعت برشی نمونه‌های کنسانتره توت سفید در دماهای 25، 45 و 65 درجه سانتی‌گراد و غلظت‌های 45، 55 و 65 درجه بریکس، از دستگاه رئومتر (Anton Paar Physica rheometer, MCR301, Austria) با شکل هندسی صفحه و مخروط استفاده شد. دستگاه رئومتر مورد استفاده مجهز به سیستم کنترل دما و ترموستات برای کنترل دما حین انجام آزمون بود. اندازه‌گیری‌ها در محدوده سرعت برشی 0 تا 200 s^{-1} انجام شد.

2-4- مدل‌سازی رفتار رئولوژیکی

به منظور تعیین بهترین مدل برای توصیف رفتار رئولوژیکی نمونه‌های کنسانتره توت سفید، داده‌های به دست آمده برای تنش برشی در مقابل سرعت برشی با مدل‌های رئولوژیکی مختلف برازش شد (جدول 1). برای تعیین بهترین مدل، از دو معیار آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد و مدلی که دارای R^2 بالاتر و RMSE کمتر بود، به عنوان مدل بهتر انتخاب شد.

می‌شود (2 و 12). پژوهشگران مختلفی با موفقیت از این روش برای بررسی اثر ترکیبی دما و غلظت روی ویسکوزیته مایعات غذایی مانند کنسانتره میوه پوملو¹ (13)، عصاره انار (14)، شیر خرما (15)، کنسانتره میوه استوایی ساورسوپ² (2) و کنسانتره میوه ساپوتا³ (10) استفاده نمودند. مطابق بررسی‌های انجام شده، مطالعه‌ای در ارتباط با ارزیابی رفتار رئولوژیکی کنسانتره توت سفید در دما و غلظت‌های مختلف انجام نشده است. بنابراین، در مطالعه حاضر ضمن انجام این کار، مدل‌سازی رفتار رئولوژیکی کنسانتره توت سفید در دما و غلظت‌های مختلف با استفاده از مدل‌های موجود در منابع علمی انجام شد و اثر دما و غلظت (به طور جداگانه و ترکیبی) روی ویسکوزیته نمونه‌ها بررسی شد.

2- مواد و روش‌ها

2-1- مواد و نحوه تهیه عصاره تغلیظ شده

پس از خرید توت سفید از بازار، تمیز کردن و جداسازی نمونه‌ها بر اساس رنگ، تازگی و اندازه انجام شد. سپس، عصاره تغلیظ شده تهیه شد. توت‌ها با کمی آب به داخل دیگ مسی ریخته و حرارت‌دهی شدند که دلیل افزودن آب جلوگیری از ته گرفتن توت‌ها در ظرف مسی بود. تغلیظ عصاره تا درجه بریکس 65 ($\text{pH} = 5/62$) انجام شد. سپس برای تهیه بریکس‌های 45 و 55، عصاره تغلیظ شده با بریکس 65 با میزان مشخصی از آب مقطر رقیق شد. عصاره تهیه شده تا زمان انجام آزمون رئولوژیکی در شرایط یخچال نگهداری شد.

2-2- اندازه‌گیری pH و بریکس

در پژوهش حاضر، بریکس یا درصد مواد جامد محلول و pH نمونه در دمای 20 درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری

¹ Pomelo
² Soursop
³ Sapota

جدول 1: مدل‌های رئولوژیکی مورد استفاده در شرح رفتار رئولوژیک کنسانتره توت سفید

Model No.	Model name	Equation	Model parameters
1	Newtonian	$\sigma = h \dot{\gamma}$	σ = shear stress (Pa) = Newtonian viscosity (Pa.s) η $\dot{\gamma}$ = shear rate (s^{-1})
2	Power law	$\sigma = K \dot{\gamma}^n$	σ = shear stress (Pa) K = consistency coefficient (Pa.s ⁿ) n = flow behavior index (dimensionless) $\dot{\gamma}$ = shear rate (s^{-1})
3	Bingham	$\sigma = \sigma_0 + K \dot{\gamma}$	σ = shear stress (Pa) σ_0 = yield stress (Pa) K = consistency coefficient (Pa.s ⁿ) $\dot{\gamma}$ = shear rate (s^{-1})
4	Casson	$\sigma^{0.5} = \sigma_0 + K \dot{\gamma}^{0.5}$	σ = shear stress (Pa) σ_0 = yield stress (Pa) K = consistency coefficient (Pa.s) $\dot{\gamma}$ = shear rate (s^{-1})

(معادله 3) و نمایی (معادله 4) استفاده شد و پارامترهای هر دو مدل تعیین شدند (2 و 15).

$$h = h_1 C^{n_1} \quad (3)$$

$$h = h_2 \exp(n_2 C) \quad (4)$$

در روابط فوق، η = ویسکوزیته (Pa.s)، η_1 و η_2 = ثابت-های تجربی (Pa.s)، n_1 و n_2 = ثابت‌های تجربی و C = غلظت ($^{\circ}\text{Brix}$) است.

7-2- اثر ترکیبی دما و غلظت روی ویسکوزیته

برای بررسی اثر ترکیبی دما و غلظت روی ویسکوزیته کنسانتره توت سفید از دو رابطه 6 و 7 استفاده شد (2 و 10):

$$h = h_3 C^{n_3} \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (5)$$

$$h = h_4 \exp\left(n_4 C + \frac{E_a}{RT}\right) \quad (6)$$

در روابط فوق، η = ویسکوزیته (Pa.s)، η_3 و η_4 = ثابت-های تجربی (Pa.s)، n_3 (بدون بعد) و n_4 ($^{\circ}\text{Brix}^{-1}$) =

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

که در آن $X_{\text{exp},i}$ امین داده آزمایشی، $X_{\text{pre},i}$ امین داده پیش‌بینی شده و N تعداد مشاهدات را نشان می‌دهند.

$$h = h_1 C^{n_1} \quad (3)$$

$$h = h_2 \exp(n_2 C) \quad (4)$$

برای بررسی اثر دما روی ویسکوزیته کنسانتره‌های توت سفید در غلظت‌های مختلف از رابطه آرنیوس (معادله 2) استفاده شد و مقادیر انرژی فعال‌سازی نیز برای هر غلظت تعیین شد (2 و 16).

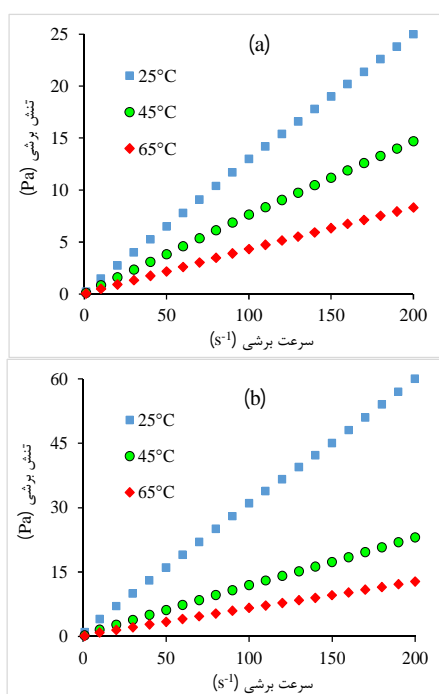
$$\eta = \eta_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2)$$

که در آن η = ویسکوزیته (Pa.s)، η_0 = ثابت تجربی مدل (Pa.s)، E_a = انرژی فعال‌سازی (kJ/mol)، R = ثابت جهانی گاز (kJ/(mol.K)) و T = دمای مطلق (K) است.

2-6- اثر غلظت روی ویسکوزیته

برای بررسی اثر غلظت روی ویسکوزیته کنسانتره‌های توت سفید در دماهای مختلف از روابط قانون توان

آمده با مدل قانون توان (مدل 2 در جدول 1) برازش شد و مقادیر به دست آمده برای شاخص رفتار جریان (n) در محدوده 0/98 تا 1 به دست آمد (جدول 2) که تأییدکننده رفتار تقریباً نیوتنی می‌باشد. قابل ذکر است که مدل‌های قانون توان و بینگهام (مدل 3 در جدول 1) دارای بهترین برازش با داده‌های تنش برشی - سرعت برشی بودند ($R^2 \geq 0/999$) (جدول 2). مطابق جدول 2، در برازش داده‌ها با مدل بینگهام، مقادیر تنش تسلیم برای برخی از ترکیب‌های دما- غلظت منفی به دست آمد که به لحاظ فیزیکی بدون معنی است (2 و 17). به همین دلیل، مدل قانون توان به عنوان بهترین مدل انتخاب شد.

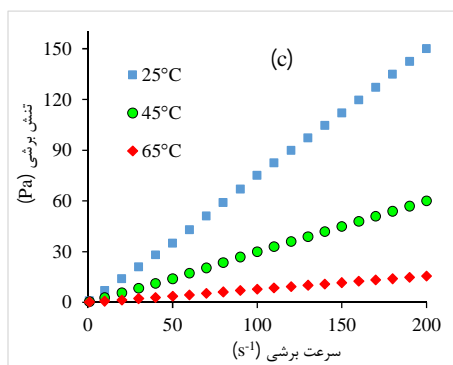


ثابت‌های تجربی، $C = \text{غلظت } (^\circ\text{Brix})$ ، $E_a = \text{انرژی فعال‌سازی } (kJ/mol)$ ، $R = \text{ثابت جهانی گاز}$ و $T = \text{دمای مطلق } (K)$ است.

3- نتایج و بحث

3-1- ارزیابی رفتار رئولوژیکی

شکل 1 نمودارهای تنش برشی در مقابل سرعت برشی برای نمونه‌های کنسانتره توت سفید در غلظت‌ها (بریکس‌های 45، 55 و 65) و دماهای مختلف (25، 45 و 65 درجه سانتی‌گراد) را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، رابطه بین تنش برشی و سرعت برشی در تمامی شرایط مورد آزمون خطی است که نشان‌دهنده رفتار نیوتنی است. نمونه‌های با غلظت بالاتر (شکل 1- c) در مقایسه با کنسانتره‌های دارای غلظت پایین‌تر (شکل 1- a) به طور قابل توجهی دارای میزان تنش برشی بیشتری بودند که می‌تواند به دلیل بالاتر بودن ویسکوزیته این نمونه‌ها باشد. همچنین، در یک غلظت یکسان، با افزایش دما از 25 به 65 درجه سانتی‌گراد میزان تنش برشی به طور قابل توجهی کاهش پیدا کرد. این نتایج با یافته‌های سایر پژوهشگران در تطابق است (2، 10 و 17). از دیدگاه مهندسی، کاهش تنش برشی در دمای بالاتر می‌تواند برای پمپ کردن راحت‌تر محصول طی فرآیندهای غذایی حائز اهمیت باشد. برای مدل‌سازی رفتار رئولوژیکی نمونه‌ها، داده‌های به دست آمده برای تنش برشی در مقابل سرعت برشی با مدل رئولوژیکی از نوع نیوتنی (مدل 1 در جدول 1) برازش شد و مقادیر ویسکوزیته تعیین گردید. همچنین، برای اطمینان از رفتار نیوتنی نمونه‌ها، داده‌های به دست



شکل 1: رئوگرام تنش برشی در مقابل سرعت برشی کنسانتره توت سفید در دما و غلظت‌های مختلف (a: 45 °Brix, b: 55 °Brix, and c: 65 °Brix)

جدول 2: پارامترهای مربوط به مدل‌های قانون توان و بینگهام در دماها و غلظت‌های مختلف

R ²	σ_0 (تنش تسلیم)	n	K	غلظت	دما	مدل
0/9998	-	0/9804	0/1398	45	25	قانون توان
0/9993	-	0/9822	0/3309	55		
0/9996	-	0/9991	0/7499	65		
0/9998	-	0/9807	0/0821	45	45	
0/9993	-	0/9818	0/1275	55		
0/9996	-	0/9992	0/2998	65		
0/9998	-	0/9798	0/0467	45	65	
0/9993	-	0/9835	0/0699	55		
0/9995	-	0/9993	0/0780	65		
0/9997	0/3124	-	0/1245	45	25	بینگهام
0/9998	1/23	-	0/2938	55		
0/9998	-1/322	-	0/7562	65		
0/9997	0/1798	-	0/0732	45	45	
0/9997	0/4405	-	0/1132	55		
0/9998	-0/5113	-	0/3023	65		
0/9997	0/1041	-	0/0415	45	65	
0/9997	0/2418	-	0/0626	55		
0/9997	-0/1195	-	0/0786	65		

2-3- مقادیر ویسکوزیته و اثر دما روی آن

ویسکوزیته بیانگر مقاومت یک سیال در برابر جریان یافتن است. عوامل متعددی مانند دما، غلظت مواد جامد محلول،

وزن مولکولی اجزاء محلول، مواد جامد معلق، درجه برش و زمان برش بر ویسکوزیته محلول غذایی تأثیر می‌گذارند. در پژوهش حاضر، اثر دما روی ویسکوزیته

فعال‌سازی بالا نشان می‌دهد که تغییرات ویسکوزیته وابستگی بیشتری به دما دارد (11). مطابق جدول 3، مقدار انرژی فعال‌سازی بسته به غلظت در محدوده 22/97 تا 47/14 کیلوژول بر مول به دست آمد. به طور کلی، مقدار انرژی فعال‌سازی تحت تأثیر دما، غلظت و ترکیب نمونه قرار می‌گیرد. جدول 3 نشان می‌دهد که با افزایش غلظت نمونه در محدوده دمایی 25 تا 65 درجه سانتی‌گراد، مقدار انرژی فعال‌سازی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. با افزایش دما ساختار درون سیال دچار تغییرات زیادی می‌شود که به شدت وابسته به دما است (11). مطابق جدول 3، تغییرات دما در سرعت برشی ثابت بیشترین تأثیر را در بریکس 65 از خود نشان داد. این درحالی است که نمونه با بریکس 45 که دارای کمترین مقدار انرژی فعال‌سازی است (جدول 3)، کمترین حساسیت را نسبت به تغییرات دما داشته است. نتایج مشابهی توسط صالحی و کاشانی‌نژاد (6) برای کنسانتره ازگیل وحشی (9/59 تا 43/39 کیلوژول بر مول در دماهای 20 تا 70 درجه سانتی‌گراد و غلظت‌های 14 تا 56 درجه بریکس)، Quek و همکاران (2) برای کنسانتره میوه ساورسوپ (8/32 تا 30/48 کیلوژول بر مول در دماهای 10 تا 70 درجه سانتی‌گراد و غلظت‌های 10 تا 50 درجه بریکس) و Swami-Hulle و همکاران (16) برای کنسانتره آلونته‌ورا (12/148 تا 53/073 کیلوژول بر مول در دماهای 15 تا 55 درجه سانتی‌گراد) گزارش شد.

نمونه‌های کنسانتره توت سفید توسط رابطه آرنیوس (معادله 2) بررسی شد و مقادیر انرژی فعال‌سازی در غلظت‌های مختلف و همچنین اثر دما و غلظت روی ویسکوزیته تعیین شد. مطابق جدول 3 و در یک غلظت معین، با افزایش دما مقدار ویسکوزیته کاهش پیدا می‌کند. همچنین، در یک دمای مشخص، با افزایش غلظت از 45 به 65 درجه بریکس، مقدار ویسکوزیته افزایش یافت. نتایج مشابهی توسط Quek و همکاران (2) برای کنسانتره میوه ساورسوپ، Deshmukh و همکاران (10) برای کنسانتره میوه ساپوتا و Cristina-dos-Santos-Bofo و همکاران (17) برای ملاس نیشکر گزارش شد. به طور کلی، بررسی رفتار رئولوژیکی عصاره‌ها در تعیین ویسکوزیته آن‌ها در طی فرآیند تغلیظ مهم می‌باشد. همچنین، شناخت مناسب از ویژگی‌های رئولوژیکی چنین سیالانی در طراحی و بهینه‌سازی عملیات واحد در حین فرآیند مهم و تعیین‌کننده است. تعیین ویسکوزیته محصول جهت تعیین نرخ انتقال حرارت، میزان مصرف انرژی در اثر افزایش غلظت و برای کنترل دما و شدت جریان جهت اطمینان از جریان مداوم محصول ضروری است (11). انرژی فعال‌سازی نشان‌دهنده یک مانع (سد) انرژی است که باید قبل از این که فرآیند اتفاق بیفتد، بر آن غلبه کرد. به طور کلی هرچه انرژی فعال‌سازی بیشتر باشد، اثر دما بر ویسکوزیته بیشتر است. مقدار انرژی

جدول 3: پارامترهای معادله آرنیوس، ویسکوزیته و انرژی فعال‌سازی کنسانتره توت سفید در غلظت‌های مختلف

Concentration (°Brix)	Temperature (°C)	η (Pa.s)	E_a (kJ/mol)	Statistical parameters	
				R^2	RMSE
45	25	0/13	22/97	0/99	0/21
	45	0/07		0/99	0/12
	65	0/04		0/99	0/07
55	25	0/30	32/55	0/99	0/49
	45	0/12		0/99	0/26
	65	0/06		0/99	0/14
65	25	0/75	47/14	0/99	0/47
	45	0/30		0/99	0/39
	65	0/08		0/99	0/10

3-3- اثر غلظت روی ویسکوزیته

تغییر ویسکوزیته با غلظت مواد جامد محلول با مدل‌های قانون توان (معادله 3) و نوع نمایی (معادله 4) ارزیابی شد (2). به منظور به دست آوردن پارامترهای رئولوژیکی این مدل‌ها (n_1 ، n_2 ، η_1 ، η_2)، مقادیر ویسکوزیته با شکل خطی مدل‌ها برازش شد. مطابق جدول 4، مقادیر R^2 به دست آمده نشان می‌دهد که مدل‌های مورد استفاده به خوبی اثر غلظت روی ویسکوزیته را توصیف می‌کنند. همچنین، با افزایش دما مقادیر n_1 و n_2 کاهش پیدا کرد؛ در حالی که مقادیر η_1 و η_2 افزایش یافت. کاهش مقادیر n_1 و n_2 با افزایش دما بدان معنی است که وابستگی غلظت به دماهای بالاتر کمتر می‌شود. نتایج مشابهی توسط

صالحی و کاشانی‌نژاد (6) برای کنسانتره ازگیل وحشی و Quek و همکاران (2) برای کنسانتره میوه ساورسوپ گزارش شد. مطابق جدول 4، ویسکوزیته نمونه‌ها به شدت تحت تأثیر میزان مواد جامد محلول قرار گرفت؛ به طوری که با افزایش غلظت مواد جامد محلول از 45 به 65 درصد، ویسکوزیته از $1/32 \times 10^{-9}$ تا 5^{-5} $6/74 \times 10$ پاسکال ثانیه افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده وابستگی شدید ویسکوزیته نمونه‌ها به غلظت مواد جامد محلول است. بنابراین، جهت انتقال این محصول توسط پمپ در فواصل طولانی، توصیه می‌شود از غلظت‌های پایین آن که دارای ویسکوزیته کمتری است، استفاده گردد (6).

جدول 4: اثر غلظت بر روی ویسکوزیته توت سفید کنسانتره در دماهای مختلف

T (°C)	C (°Brix)	$h = h_1 C^{n_1}$		$h = h_2 \exp(n_2 C)$			
		n_1 (dimensionless)	η_1 (Pa.s)	R^2	n_2 (°Brix ⁻¹)	η_2 (Pa.s)	R^2
25	45	4/82	$10^{-9} \times 1/32$	0/99	0/09	$3^{-10} \times 2/30$	0/99
	55						
	65						
45	45	3/75	$8^{-10} \times 4/33$	0/94	0/07	$3^{-10} \times 2/94$	0/96
	55						
	65						
65	45	1/70	$5^{-10} \times 6/74$	0/98	0/03	$2^{-10} \times 1/08$	0/96
	55						
	65						

3-4- اثر ترکیبی دما و غلظت روی ویسکوزیته

اثر ترکیبی دما و غلظت روی ویسکوزیته کنسانتره توت سفید توسط دو مدل نمایی مورد بررسی قرار گرفت (روابط 5 و 6). این مدل‌ها برای اهداف مهندسی و طراحی می‌توانند مفید باشند؛ زیرا برای کاربردهای مهندسی، دستیابی به رابطه‌ای که بتواند به طور همزمان اثر ترکیبی

دما و غلظت روی پارامترهای رئولوژیکی مواد غذایی مایع را نشان دهد، بسیار حائز اهمیت است (2). از طریق رگرسیون چندمتغیره در نرم‌افزار MATLAB، پارامترهای هر دو مدل نمایی (n_3 ، n_4 ، η_3 و η_4) تعیین و مقایسه بین دو مدل انجام شد.

از داده‌های به دست آمده در طراحی تجهیزات برای تولید صنعتی یا نیمه‌صنعتی این محصول مفید واقع شود.

5- منابع

1. Elhamirad, A.H. (2013). Optimization of juice clarification of two native white mulberry (*Morus Alba*) varieties. *Innovation in Food Science and Technology (Journal of Food Science and Technology)*, Volume 5, Number 1 (15); 91 - 103.
2. Quek, M. C., Chin, N. L., & Yusof, Y. A. 2013. Modelling of rheological behaviour of soursop juice concentrates using shear rate-temperature-concentration superposition. *Journal of Food Engineering*, 118(4), 380-386.
3. Karaman, S., & Kayacier, A. 2011. Effect of temperature on rheological characteristics of molasses: Modeling of apparent viscosity using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS). *LWT-Food Science and Technology*, 44(8), 1717-1725.
4. Toker, O. S., & Dogan, M. (2013). Effect of temperature and starch concentration on the creep/recovery behaviour of the grape molasses, modelling with ANN, ANFIS and response surface methodology. *European Food Research and Technology*, 236(6), 1049-1061.
5. Belibağlı, K. B., & Dalgic, A. C. 2007. Rheological properties of sour-cherry juice and concentrate. *International journal of food science & technology*, 42(6), 773-776.
6. Salehi F., Kashaninejad M. (2017). Physicochemical And Rheological Properties Of Wild Medlar Concentrate, *Iranian Journal Of Food Science And Technology*, Volume 13, Number 59; 49 - 57.
7. Altan, A., & Maskan, M. 2005. Rheological behavior of pomegranate (*Punica granatum L.*) juice and concentrate. *Journal of Texture studies*, 36(1), 68-77.

برای رابطه 5:

$$\eta_3 = 3/61 \times 10^{-13} \text{ (Pa.s)}, n_3 = 3/42, E_a = 34/25 \text{ (kJ/mol)}, R^2 = 0/94$$

برای رابطه 6:

$$\eta_4 = 9/64 \times 10^{-9} \text{ (Pa.s)}, n_4 = 0/0632 \text{ (}^\circ\text{Brix}^{-1}\text{)}, E_a = 34/25 \text{ (kJ/mol)}, R^2 = 0/95$$

مطابق نتایج به دست آمده، هر دو مدل نمایی به دلیل داشتن R^2 نسبتاً بالا برای بررسی اثر ترکیبی دما و غلظت روی ویسکوزیته کنسانتره توت سفید خوب هستند. با این حال، رابطه 6 به دلیل داشتن R^2 بالاتر این اثر ترکیبی را کمی بهتر توصیف می‌کند. نتایج مشابهی توسط Quek و همکاران (2) برای کنسانتره میوه ساورسوپ و Deshmukh و همکاران (10) برای کنسانتره میوه ساپوتا گزارش شد.

4- نتیجه‌گیری

کنسانتره یا عصاره تغلیظ شده توت سفید یک منبع غنی از املاح و ترکیبات قندی است. در پژوهش حاضر اثر دما و غلظت (به طور جداگانه و ترکیبی) روی رفتار رئولوژیکی کنسانتره توت سفید بررسی شد. نتایج نشان داد که نمونه‌های کنسانتره توت سفید در تمامی ترکیب‌های دما-غلظت مورد استفاده دارای رفتار نیوتنی بودند و مقدار شاخص رفتار جریانی در محدوده 0/98 تا 1 به دست آمد. علاوه بر این، اثر جداگانه دما و غلظت روی ویسکوزیته نمونه‌ها به خوبی توسط معادله آرنیوس ($R^2 \geq 0/99$)، جدول 3) و روابط نمایی ($R^2 \geq 0/95$) یا قانون توان ($R^2 \geq 0/93$) (جدول 4) توصیف شد. همچنین، با ترکیب کردن معادله آرنیوس (رابطه 2) با روابط نمایی یا توانی (روابط 3 و 4)، اثر ترکیبی دما و غلظت روی ویسکوزیته نیوتنی نمونه‌ها به خوبی پیش‌بینی شد ($R^2 = 0/95$)، رابطه 6). در مجموع، نتایج پژوهش حاضر می‌تواند جهت آگاهی از رفتار رئولوژیکی کنسانتره توت سفید و استفاده

- rheological properties pomelo juice concentrates. *International Food Research Journal*, 19(2):553-562.
14. Bodbodak, S., Kashaninejad, M., Hesari, J., & Razavi, S.M.A. 2013. Modeling of rheological characteristics of "Malas Yazdi" pomegranate juice, *Journal of Agricultural sciences and Technology*, 15: 961-971.
 15. 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.
 16. Swami Hulle, N. R., Patruni, K., & Rao, P. S. (2014). Rheological properties of aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) juice concentrates. *Journal of Food Process Engineering*, 37(4), 375-386.
 17. Cristina dos Santos Bofo, D., Alexandre Ferreira Cabral, R., Andrietta, S. R., & Telis-Romero, J. (2016). Rheological behavior of molasses for application in industry. *Environmental Progress & Sustainable Energy*.
 8. Tavakolipour, H., Kalbasi Ashtari, A. (2013). Determination of rheological properties of grape molasses, *Iranian Journal of Food Science and Technology*, Volume 10, Number 40; 129 – 137.
 9. Barbana, C., & El-Omri, A. 2012. Viscometric behavior of reconstituted tomato concentrate. *Food and Bioprocess Technology*, 5(1), 209-215.
 10. Deshmukh, P. S., Manjunatha, S., & Raju, P. 2015. Rheological behaviour of enzyme clarified sapota (*Achras sapota* L) juice at different concentration and temperatures. *Journal of food science and technology*, 52(4), 1896-1910.
 11. Karazhiyan, H., Hosseinibay E., Allah Mirzaee H. (2016). Rheological properties of Liquorice (*Glycyrrhiza glabra*) extract, *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 12(1), 193-200.
 12. Kaya, A., & Belibağlı, K. 2002. Rheology of solid gaziantep pekmez. *Journal of Food Engineering*, 54(3), 221-226.
 13. Keshani, S., Luqman Chuah, A., & Russly, A.R. 2012. Effect of temperature and concentration on