

بررسی رفتار جریان برشی پایای آب میوه هلوی ایرانی: اثر غلظت و دما

علیرضا یوسفی^{۱*}، فاطمه شاهی^۲، حسین شیخلویی^۳

۱. استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه بناب
- ۲ دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه
۳. استادیار، گروه شیمی و مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه

(تاریخ دریافت: ۹۴/۸/۱۲، تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۲/۱)

چکیده

در بین آب‌میوه‌ها، آب هلو محبوبیت زیادی دارد و از لحاظ تغذیه‌ای نیز بسیار مورد توجه است. یکی از منابع اصلی تولید آب‌میوه هلو در ایران پوره هلوی ایرانی می‌باشد. در این پژوهش، رفتار جریان برشی پایای آب‌میوه تهیه شده از این پوره در غلظت ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه بریکس و دمای ۵، ۲۵، ۴۵ و ۶۵ درجه سانتی‌گراد تعیین شد. داده‌های تنش برشی-سرعت برشی به دست آمده از آب‌میوه‌ها، توسط مدل‌های رئولوژیکی مختلف شامل نیوتنی، قانون توانی، بینگهام و هرشل-بالکلی برازش شدند. وابستگی به غلظت، توسط مدل‌های قانون توانی و نمایی و وابستگی به دما توسط مدل آرنیوس-ارینگ تعیین گردید. تمامی نمونه‌ها دارای رفتار سودوپلاستیک بودند. مدل قانون توانی (استوالد-والز) با داشتن ضریب تبیین بالا ($R^2 = 0/934-0/999$) و جذر میانگین مربعات خطای پایین ($RMSE = 0/027-0/327$) دارای بهترین برازش با داده‌های آزمایشگاهی بود. بر اساس نتایج این مدل مشاهده شد که افزایش دما سبب افزایش شاخص رفتار جریان (n) و کاهش ضریب قوام (k) گردید. از طرف دیگر افزایش غلظت سبب کاهش n و افزایش k گردید. مدل قانون توانی هم‌چنین قادر بود وابستگی به غلظت ویسکوزیته ظاهری را با دقت بالایی پیش‌بینی کند. وابستگی ویسکوزیته ظاهری (η_{50}) به غلظت با افزایش دما افزایش یافت. مدل ترکیبی قانون توانی-آرنیوس برای اثر غلظت-دما بر ویسکوزیته ظاهری (η_{50})، تطابق بالایی را نشان داد ($R^2 = 0/997$ و $RMSE = 0/040$). بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که دما و غلظت به‌طور کامل بر خصوصیات رئولوژیکی آب‌میوه‌های هلوی ایرانی اثرگذارند.

واژه‌های کلیدی: آب‌میوه هلو، رئولوژی، دما، غلظت، مدل‌سازی.

1- مقدمه

7/2 تا 57/6 بر ثانیه بود. آن‌ها همچنین بیان کردند که رفتار تیکسوتروپ با کاهش دما و افزایش غلظت افزایش می‌یابد [7]. تاوارسا و همکاران (2007) خصوصیات رئولوژیکی آب پرتقال منجمد با بریکس 46/56 تا 65/04 را در گستره دمایی 18- تا صفر درجه سانتی‌گراد مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس نتایج، مدل قانون توانی برازش خوبی را با داده‌های تنش-سرعت برشی نشان داد و در غلظت‌های بالا رفتار تیکسوتروپ مشاهده شد [8]. آئوگوستا و همکاران (2011)، اثر افزودن فیبر هلو بر خواص رئولوژیکی آب‌میوه هلو را بررسی کردند. بسته به غلظت، نوع رفتار رئولوژیکی تغییر یافت به طوری که در آب میوه بدون فیبر رفتار نیوتنی، در آب میوه حاوی 2/5 تا 7/5 درصد فیبر رفتار سودوپلاستیک و در 10 و 12/5 درصد فیبر رفتار پلاستیک هرشل بالکلی مشاهده گردید [9]. کشانی و همکاران (2012)، خصوصیات رئولوژیکی آب پوملو (یک نوع مرکبات) را مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که در غلظت‌های پایین، رفتار نیوتنی و در غلظت‌های بالا رفتار غیرنیوتنی نشان می‌دهد. برای غلظت‌های بالا، مدل قانون توانی و هرشل بالکلی بهتر از مدل‌های بینگهام و کاسون رفتار آب پوملو را توصیف کردند [10]. احمد و همکاران (2007) به مطالعه رفتار رئولوژیکی دینامیک و برشی پایای آب‌میوه تمبر هندی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که رفتار جریان برشی پایای تمبر هندی در محدوده دمایی 90-10 درجه سانتی‌گراد از نوع سودوپلاستیک است که با مدل کارو به خوبی قابل برازش می‌باشد. همچنین آن‌ها بیان کردند که رابطه بین ویسکوزیته دینامیک (ویسکوزیته کمپلکس) و ویسکوزیته ظاهری در بیش‌تر دماها از قانون کوکس-مرز¹ پیروی نمی‌کند [11]. کوئک و همکاران (2013) به مطالعه خصوصیات جریان برشی پایای آب‌میوه سبادیل تحت تاثیر دما، 70-10 درجه سانتی‌گراد، غلظت، 50-10 درجه بریکس و کرنش، 0-400 معکوس ثانیه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که نمونه‌های این آب‌میوه دارای رفتار سودوپلاستیک و مدل قانون توان دارای برازش مناسبی با داده‌های تجربی است [12].

با توجه به اهمیت مطالعه رفتار رئولوژیکی آب‌میوه‌ها که در بالا ذکر گردید، هدف از این پژوهش مدل‌سازی رفتار جریان برشی پایای آب‌میوه‌های هلو ایرانی، به عنوان یکی از منابع

آب هلو از نظر میزان تولید، بالاترین بازار جهانی را در بین آب‌میوه‌ها داشته و به علت داشتن ویتامین‌های مختلف از جمله A و C و همچنین سرشار بودن از یون پتاسیم از نظر تغذیه‌ای بسیار مورد توجه قرار گرفته است [1]. در ایران آب هلو از آب میوه هلوی ایرانی تولید می‌گردد. بررسی خصوصیات رئولوژیکی مواد غذایی می‌تواند اطلاعات بسیار خوبی از نحوه تغییر ساختار آن‌ها هنگامی که تحت فرایندهای مختلف قرار می‌گیرند، بیان کند [4-2]. خواص رئولوژیکی آب‌میوه‌ها و کنسانتره‌های آن‌ها از دیدگاه طراحی دستگاه‌ها و انتقال مواد و همچنین ویژگی‌های عطر و طعم، اهمیت بالایی دارد. بسته به عوامل مختلف مانند غلظت، دما و انجام یا عدم انجام فرایند شفاف کردن، عصاره میوه‌ها می‌توانند رفتار رئولوژیکی متفاوتی مانند نیوتنی، سودوپلاستیک، پلاستیک و تیکسوتروپیک داشته باشند [5]. از طرفی یافتن مدلی مناسب برای توصیف رفتار رئولوژیک آن‌ها می‌تواند منجر به کاهش آزمایش‌های تجربی و طراحی صحیح فرایندها و دستگاه‌های مورد استفاده گردد. همچنین بررسی اثر دما و غلظت توسط مدل‌های مختلف مانند مدل آرنیوس، آرنیوس-ایرینگ، قانون توانی و مدل نمایی می‌تواند در این رابطه مفید باشد. مدل‌های رئولوژیکی مختلفی برای بررسی خصوصیات جریان برشی پایای مواد غذایی به کار برده می‌شود و از آن‌جایی که رفتار بسیاری از سیالات غذایی غیرنیوتنی است، می‌توان به مدل‌های قانون توانی (استوالد-والز)، هرشل-بالکلی، بینگهام، کسون و سیسکو که مخصوص این گروه از سیالات است، اشاره کرد [6]. یکی از راه‌های بررسی و مطالعه اثر متغیرهای دما و غلظت بر رفتار سیالات غذایی مثل انواع آب‌میوه‌ها و آب‌میوه‌های میوه، مطالعه روند تغییرات پارامترهای مدل‌های رئولوژیکی مناسب تحت تاثیر این متغیرها است. پژوهش‌های زیادی در مورد بررسی خصوصیات رئولوژیکی انواع آب‌میوه‌ها و یا آب‌میوه‌ها در طی سال‌های اخیر انجام شده است که چند مورد از آن‌ها به این شرح بیان می‌گردد. راموس و ایباز (1998)، گزارش کردند که کنسانتره آب پرتقال حاوی پالپ و پکتین، دارای رفتار تیکسوتروپ در بریکس 55 و 60 و در گستره دمای 0 تا 20 درجه سانتی‌گراد و سرعت‌های برشی

اصلی تولید آب میوه در ایران، در غلظت‌های 5، 10، 15، 20 و 25 درجه بریکس و دماهای مختلف 5، 25، 45 و 65 درجه سانتی‌گراد بود. به علاوه میزان وابستگی به غلظت و دما نیز توسط مدل‌های مناسب بیان گردید. لازم به ذکر است که این پژوهش برای اولین بار در ایران صورت می‌گیرد که اثر دامنه وسیعی از غلظت و دما را بر رفتار رئولوژیکی آب میوه هلوی ایرانی مورد بررسی قرار داده است.

2- مواد و روش‌ها

در این پژوهش کنسانتره هلوی ایرانی از شرکت تکدانه مرنده تهیه شد.

1-2- روش‌های تولید و آماده سازی نمونه‌ها

پوره‌های هلوی ایرانی توسط آب مقطر رقیق شده و 5 غلظت از آن‌ها شامل بریکس‌های 5، بریکس آب میوه تجاری، 10، 15، 20 و 25 تهیه گردید.

2-2- آزمون رئولوژیکی

رفتار جریان برشی پایای آب میوه هلوی ایرانی در غلظت‌های ذکر شده و در دمای 5، 25، 45 و 65 درجه سانتی‌گراد با استفاده از دستگاه رئومتر Physica Anton Paar، مدل MCR 301 ساخت کشور اتریش، مجهز به پروب با شکل هندسی استوانه‌ای هم مرکز تعیین شد. دامنه کرنش اعمال شده از 1 تا 100 معکوس ثانیه به صورت پیش رونده بود و داده‌های تنش در برابر کرنش توسط دستگاه ثبت شده و نتایج با استفاده از مدل‌های رئولوژیکی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تمام آزمون‌های رئولوژیکی در دو تکرار صورت گرفت و میانگین نتایج به دست آمده نشان داده شده و گزارش گردیدند.

3-2- مدل سازی رئولوژیکی

رفتار جریان وابسته به سرعت برشی نمونه‌های آب میوه هلوی ایرانی با استفاده از چهار مدل رئولوژیکی مستقل از زمان به ترتیب شامل مدل نیوتنی¹، معادله (1)، قانون توانی²، معادله (2)، مدل

بینگهام¹، معادله (3) و مدل هرشل-بالکلی²، معادله (4) و با استفاده از جعبه ابزار Curve fitting نرم افزار Matlab انجام شد:

$$\tau = \mu\dot{\gamma} \quad (1)$$

در این معادله μ ویسکوزیته نیوتنی (ویسکوزیته واقعی) می‌باشد.

$$\tau = k_p \dot{\gamma}^{n_p} \quad (2)$$

که در این معادله k_p ضریب قوام قانون توانی ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{n_p}$) و n_p شاخص رفتار جریان قانون توانی می‌باشد.

$$\tau = \tau_{0B} + \mu_B \dot{\gamma} \quad (3)$$

که در این معادله η_B ویسکوزیته پلاستیک بینگهام ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) و τ_{0B} تنش تسلیم بینگهام می‌باشد.

$$\tau = \tau_{0H} + k_H \dot{\gamma}^{n_H} \quad (4)$$

که در آن τ_{0H} تنش تسلیم هرشل-بالکلی، k_H ضریب قوام هرشل-بالکلی و n_H شاخص رفتار جریان هرشل بالکلی می‌باشد.

4-2- وابستگی به غلظت

وابستگی ویسکوزیته ظاهری به غلظت در تنش برشی 50 معکوس ثانیه با استفاده از مدل‌های قانون توانی، معادله (5) و نمایی، معادله (6) مورد بررسی قرار گرفتند:

$$\eta = aC^b \quad (5)$$

$$\eta = a \exp(bC) \quad (6)$$

5-2- وابستگی به دما

وابستگی دمایی ویسکوزیته در تنش برشی 50 معکوس ثانیه

1. Bingham's model
2. Herschel-Bulkley's model

1. Newtonian model
2. Power law model

نشان دهنده میزان ویسکوزیته ظاهری آبمیوه هلوی ایرانی در آن کرنش می‌باشد. همان‌طور که نمودارهای جریان نشان می‌دهند، با افزایش سرعت برشی شیب خط مماس بر نمودار در هر نقطه از کرنش کاهش می‌یابد که این رویه وجود رفتار سودوپلاستیک (تضعیف شونده با برش) را برای آبمیوه‌های مورد آزمایش نشان می‌دهد. این موضوع در ادامه توسط نتایج مدل‌سازی‌های رئولوژیکی رفتار جریان برشی پایای آبمیوه‌های هلوی ایرانی بیان گردیده است.

جدول (1) نتایج مدل‌سازی با مدل نیوتن را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دما در یک بریکس خاص میزان ویسکوزیته نیوتنی کاهش می‌یابد. به عنوان نمونه در بریکس 5 با افزایش دما از 5 به 65 درجه سانتی‌گراد میزان ویسکوزیته مدل نیوتن از 151/5 به 70/90 میلی پاسکال ثانیه کاهش می‌یابد که این کاهش برابر با 53/20 درصد می‌باشد. از سوی دیگر نتایج نشان داد که با افزایش بریکس در یک دمای خاص میزان ویسکوزیته افزایش می‌یابد. به عنوان مثال در دمای 25 درجه سانتی‌گراد با افزایش بریکس از 5 به 25

در هر غلظت با استفاده از معادله آرنیوس-ارینگ، معادله (7)، بررسی گردید و بر اساس آن میزان انرژی فعال‌سازی¹ محاسبه گردید [13]:

$$\ln\left(\frac{\eta}{\eta_r}\right) = \frac{-E_a}{R} \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right] \quad (7)$$

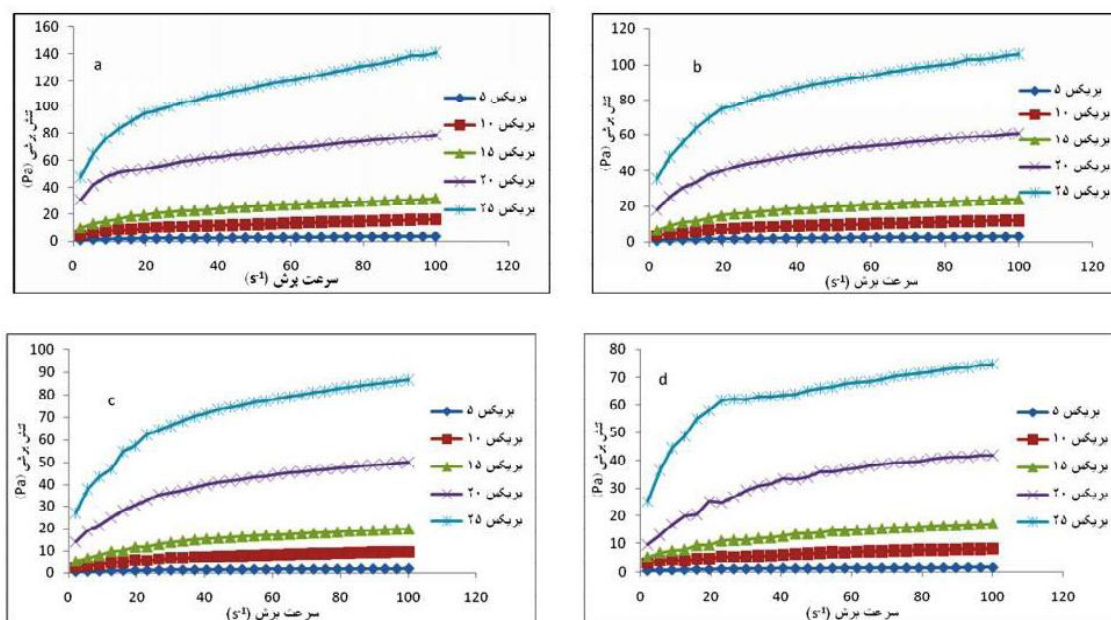
که در آن η و η_r به ترتیب ویسکوزیته ظاهری و ویسکوزیته ظاهری مرجع E_a (Pa.s)، انرژی فعال‌سازی R (kJ/mol) ثابت جهانی گازها T ، دما (K) و T_r دمای مرجع (5°C) می‌باشد.

3- نتایج و بحث

3-1- رابطه تنش برشی - سرعت برشی

شکل (1) (a تا d) نمودار عمومی جریان آبمیوه‌های هلوی ایرانی را در چهار دمای 5، 25، 45 و 65 درجه سانتی‌گراد و در غلظت‌های بریکس 5، 10، 15، 20 و 25 نشان می‌دهد. این نمودارهای جریان بر حسب تنش برشی-سرعت برشی می‌باشند که شیب خط مماس در هر نقطه از سرعت برشی

1. Activation energy



شکل (1) نمودار جریان آبمیوه هلوی ایرانی با بریکس‌های مختلف و در دماهای (a) 5، (b) 25، (c) 45 و (d) 65 درجه سانتی‌گراد

میزان ویسکوزیته مدل نیوتن از 128/4 به 1408 میلی پاسکال ثابته افزایش یافت که این افزایش معادل 996/57 درصد بود. این نتایج به طور کامل مورد انتظار بود به دلیل این که افزایش دما به دلیل افزایش جنبش مولکولی سبب کاهش ویسکوزیته می گردد و از طرفی دیگر نیز با افزایش مواد جامد محلول (بریکس) به دلیل این که نسبت جزء جامد به مایع افزایش می یابد ویسکوزیته نیز زیاد می شود.

ایبارز و همکاران (1994)، رفتار رئولوژیکی آب پرتقال پکتین زدایی شده را در گستره وسیعی از دما، 5 تا 70 درجه سانتی گراد و غلظت 30/7 تا 63/5 درجه بریکس مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این محققین نشان داد که آب پرتقال شفاف، رفتار نیوتنی از خود نشان می دهد [14].

جدول (2) نتایج مدل سازی با استفاده از مدل قانون توانی را نشان می دهد. همان طور که در اکثر روندها مشاهده می شود، در یک بریکس خاص با افزایش دما شاخص رفتار جریان (n) افزایش می یابد، به عبارت دیگر از میزان سودوپلاستیسیته رفتار جریان کم می شود. بیشترین افزایش شاخص رفتار جریان تحت تاثیر افزایش دما مربوط به بریکس 20 بود که شاخص رفتار جریان آن از 0/220 به 0/392 افزایش یافت که این مسئله افزایش 78/18 درصدی را نشان داد. لازم به ذکر است که در برخی بریکس ها روند افزایشی یا کاهشی خاصی برای اثر دما بر شاخص جریان مشاهده نگردید. نتایج اکثر روندهای تغییر شاخص رفتار جریان نشان داد که تحت تاثیر افزایش بریکس از 5 به 25 در هر دما، میزان شاخص رفتار جریان کاهش می یابد که این به معنی افزایش میزان سودوپلاستیسیته است. به عنوان نمونه در دمای 5 درجه سانتی گراد افزایش بریکس از

جدول (1) مقادیر ویسکوزیته نیوتنی آب میوه های هلوی ایرانی در غلظت ها و دماهای مختلف

دما (°C)	غلظت (درجه بریکس)	μ (mPas)	R^2	RMSE
5	25	1827	0/901	1/602
	20	1036	0/905	1/25
	15	411	0/917	0/727
	10	207	0/937	0/238
	5	151/5	0/973	0/224
25	25	1408	0/843	1/423
	20	801/2	0/860	1/04
	15	314/5	0/900	0/623
	10	156	0/918	0/432
	5	128/4	0/954	0/183
45	25	1156	0/836	0/266
	20	656/5	0/869	0/905
	15	254/9	0/983	0/546
	10	122/6	0/908	0/374
	5	82/3	0/919	0/173
65	25	1015	0/735	1/268
	20	548	0/876	0/787
	15	218/6	0/935	0/514
	10	106/3	0/950	0/369
	5	70/9	0/904	0/161

5 به 25 سبب کاهش مقدار n_p از 0/316 به 0/261 گردید که این تغییر کاهشی 17/41 درصدی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج جدول (2) به دست می‌آید، به‌طور تقریبی در همه غلظت‌ها تحت تاثیر افزایش دما میزان ضریب قوام مدل قانون توانی (k_p) کاهش می‌یابد. به عنوان مثال در بریکس 5، با افزایش دما از 5 به 65 درجه سانتی‌گراد میزان ضریب قوام از 0/790 به 0/395 (Pa.s^n) کاهش می‌یابد که نشان دهنده 50/00 درصد کاهش است. تحت تاثیر افزایش بریکس در یک دمای خاص میزان ضریب قوام در تمام دماها افزایش یافت. به عنوان نمونه در دمای 25 درجه سانتی‌گراد افزایش بریکس از 5 به 25 سبب افزایش این ضریب از 0/682 به 31/442 (Pa.s^n) گردید که این افزایش برابر با 4510/26 درصد بود.

همان‌طور که داده‌های جدول نشان می‌دهند تغییرات ضریب قوام مدل قانون توانی (k_p) تحت اثر غلظت و دما بیش‌تر از شاخص رفتار جریان آن (n_p) بود. تاوارسا و همکاران (2007) ویژگی‌های رئولوژیکی آب پرتقال منجمد با بریکس 46/56 تا 65/04 را در گستره دمایی 18- تا صفر درجه سانتی‌گراد مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنان نشان داد که مدل قانون توانی، برازش خوبی را با داده‌های تنش-سرعت برشی دارد و همچنین در غلظت‌های بالا، رفتار تیکسوتروپ مشاهده شد [8]. آئوگوستا و همکاران (2011)، اثر افزودن فیبر هلو بر خواص رئولوژیکی آب‌میوه هلو را بررسی کردند. نتایج نشان داد که محلول رفتار جریان نیوتنی تا سودوپلاستیک را دارا می‌باشد [9]. گولا و همکاران (2011)، ویژگی‌های رئولوژیکی

جدول (2) پارامترهای مدل قانون توانی برای آب‌میوه‌های هلوی ایرانی در غلظت‌ها و دماهای مختلف

RMSE	R ²	k (Pa.s^n)	n	غلظت (درجه بریکس)	دما (°C)
0/221	0/995	41/920	0/261	25	
0/170	0/992	28/114	0/220	20	
0/082	0/999	8/038	0/299	15	5
0/075	0/997	3/735	0/318	10	
0/057	0/982	0/790	0/316	5	
0/270	0/987	31/442	0/296	25	
0/202	0/989	15/735	0/300	20	
0/103	0/996	5/409	0/330	15	25
0/068	0/993	2/650	0/333	10	
0/046	0/992	0/682	0/313	5	
0/275	0/985	23/480	0/292	25	
0/203	0/989	11/009	0/337	20	
0/120	0/989	3/874	0/360	15	45
0/076	0/989	1/840	0/362	10	
0/027	0/994	0/451	0/307	5	
0/326	0/934	25/458	0/243	25	
0/211	0/987	7/321	0/392	20	
0/097	0/989	3/926	0/318	15	65
0/095	0/957	2/333	0/268	10	
0/035	0/985	0/395	0/300	5	

آب کیوی را در غلظت‌های 13/5-30 درجه بریکس و دمای 25-65 درجه سانتی‌گراد مورد مطالعه قرار دادند. مطابق نتیجه آن‌ها افزایش دما و غلظت تاثیر چندانی بر شاخص رفتار جریان (n) مدل قانون توانی نداشت، ولی به ترتیب موجب کاهش و افزایش ضریب قوام این مدل گردید [5].

جدول (3) نتایج مدل‌سازی رئولوژیکی با مدل بینگهام را نشان می‌دهد. این مدل وجود تنش تسلیم (σ_0) را برای نمونه‌های آب‌میوه هلوی ایرانی در دما و غلظت‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دما میزان تنش تسلیم بینگهام کاهش و با افزایش بریکس مقدار آن افزایش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که افزایش مواد جامد محلول سبب افزایش تنش برشی لازم جهت شروع جریان می‌شود، در حالی که دما اثری بالعکس دارد. در بریکس 5، با افزایش دما از 5 به 65 درجه سانتی‌گراد میزان σ_{0B} از 1/450 به 0/752 پاسکال کاهش می‌یابد که معادل 48/14 درصد است. در دمای 25 درجه سانتی‌گراد، افزایش بریکس از 5 به 25 درجه سبب افزایش تنش تسلیم بینگهام از 1/280 به 58/227 پاسکال گردید که این مقدار معادل 4448/98 درصد بود. بررسی نتایج ویسکوزیته بینگهام (η_B) نشان داد که در هر بریکس افزایش دما سبب کاهش ویسکوزیته بینگهام می‌گردد، در حالی که در هر دما افزایش بریکس بالعکس سبب افزایش این پارامتر گردید. برای نمونه در بریکس 5، افزایش دما از 5 به 65 درجه سانتی‌گراد سبب کاهش این پارامتر از 0/022 به 0/009 پاسکال ثانیه شد (معادل 244/44 درصد). از سوی

جدول (3) پارامترهای مدل بینگهام برای آب‌میوه‌های هلوی ایرانی در غلظت‌ها و دماهای مختلف

دما (°C)	غلظت (درجه بریکس)	σ_0 (Pa)	η_B (Pa.s)	R^2	RMSE
5	25	74/028	0/735	0/901	0/884
	20	45/220	0/370	0/905	0/700
	15	15/231	0/186	0/917	0/558
	10	7/276	0/100	0/937	0/416
	5	1/450	0/022	0/973	0/187
25	25	58/227	0/550	0/843	0/909
	20	31/141	0/342	0/860	0/761
	15	11/156	0/150	0/900	0/520
	10	5/385	0/077	0/918	0/374
	5	1/280	0/018	0/954	0/197
45	25	45/987	0/478	0/836	0/908
	20	23/470	0/310	0/869	0/717
	15	8/530	0/129	0/983	0/494
	10	4/015	0/063	0/908	0/345
	5	0/864	0/011	0/919	0/139
65	25	46/176	0/334	0/735	0/753
	20	17/636	0/287	0/876	0/731
	15	7/600	0/106	0/925	0/445
	10	3/939	0/048	0/950	0/298
	5	0/752	0/009	0/904	0/127

بر روی این پارامتر دارد، یعنی از شدت رفتار سودوپلاستیک می‌کاهد، در حالی که غلظت اثر کاهشی بر روی شاخص رفتار جریان داشته و سودوپلاستیسیته را افزایش می‌دهد. به عنوان نمونه در دمای 5 درجه سانتی‌گراد، افزایش بریکس از 5 به 25 درجه سبب کاهش n_H از 0/576 به 0/225 گردید که معادل 60/94 درصد کاهش بود. در همین دما مشاهده گردید که افزایش میزان ضریب قوام تحت اثر غلظت بسیار زیاد بود (28245/55 درصد). بر اساس نتایج تحت تاثیر دما در اکثر غلظت‌ها کاهش ضریب قوام هرشل-بالکلی مشاهده شد.

آئوگوستا و همکاران (2011)، اثر افزودن فیبر پرتقال بر خواص رئولوژیکی آبمیوه پرتقال را بررسی کردند. بسته به غلظت، نوع رفتار رئولوژیکی تغییر یافت به طوری که در

دیگر در دمای 25 درجه سانتی‌گراد افزایش بریکس از 5 به 25 درجه، سبب افزایش ویسکوزیته بینگهام از 0/018 به 0/550 پاسگال گردید (معادل 2955/56 درصد).

جدول (4) نتایج مدل‌سازی رئولوژیکی جریان برشی پایای نمونه‌های آبمیوه هلوی ایرانی به وسیله مدل هرشل-بالکلی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، اکثر مقادیر به‌دست آمده برای تنش تسلیم هرشل-بالکلی (σ_{OH}) منفی می‌باشند و در مواردی که مقادیر مثبت به‌دست آمده، مشاهده می‌شود که اثر غلظت در راستای افزایش مقدار تنش تسلیم بوده است (نتایج دمای 5 درجه سانتی‌گراد). نتایج شاخص رفتار جریان هرشل-بالکلی (n_H) به خوبی نشان می‌دهد که دما در کل، به جز تغییر دما از 5 به 25 درجه سانتی‌گراد، اثر افزایشی

جدول (4) پارامترهای مدل هرشل-بالکلی برای آبمیوه‌های هلو ایرانی در غلظت‌ها و دماهای مختلف

RMSE	R ²	kH (Pa.s ⁿ)	n_H	σ_{OH} (Pa)	غلظت (درجه بریکس)	دما (°C)
1/388	0/997	54/14	0/225	-13/8	25	
0/875	0/995	25/08	0/235	3/663	20	
0/206	0/999	8/335	0/294	-0/369	15	5
0/160	0/997	2/841	0/363	1/197	10	
0/038	0/997	0/191	0/576	0/874	5	
0/971	0/997	151/5	0/094	-127/9	25	
0/438	0/998	57/45	0/135	-45/95	20	
0/228	0/998	9/135	0/250	-4/505	15	25
0/142	0/997	2/933	0/318	-0/379	10	
0/046	0/994	0/466	0/283	0/551	5	
1/295	0/994	117/1	0/103	-100/8	25	
0/883	0/993	29/56	0/195	-21/71	20	
0/373	0/992	7/219	0/263	-4/195	15	45
0/166	0/993	2/697	0/301	-1/119	10	
0/023	0/996	0/419	0/320	0/037	5	
2/90	0/970	3732	0/003	-3718	25	
0/983	0/989	20/8	0/229	-16/53	20	
0/270	0/994	3/00	0/365	1/14	15	65
0/182	0/986	0/550	0/519	2/393	10	
0/038	0/985	0/379	0/311	0/016	5	

آب میوه بدون فیبر رفتار نیوتنی، در آب میوه حاوی 2/5 تا 7/5 درصد فیبر، رفتار سودوپلاستیک و در 10 و 12/5 درصد فیبر، رفتار پلاستیک هرشل-بالکلی ظاهر گردید [9]. کشانی و همکاران (2012)، بیان کردند که برای غلظت‌های بالا، مدل قانون توانی و هرشل-بالکلی بهتر از مدل‌های بینگهام و کاسون رفتار آب پوملو را توصیف کردند [10].

بر اساس معیار ضریب تبیین (R^2) و جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) می‌توان بیان کرد که مدل‌های قانون توانی و هرشل-بالکلی با دامنه ضریب تبیین به ترتیب 0/934-0/999 و 0/970-0/999 و هم‌چنین دامنه جذر میانگین مربعات خطای به ترتیب 0/027-0/326 و 0/023-2/90 دارای بهترین برازش با داده‌های آزمایشگاهی

3-2- وابستگی به غلظت

جدول (5) نتایج ویسکوزیته ظاهری محاسبه شده برای نمونه‌های آب‌میوه هلوی ایرانی در تنش برشی 50 معکوس ثانیه بر حسب دما و غلظت را نشان می‌دهد. جدول (6) نیز

جدول (5) ویسکوزیته ظاهری محاسبه شده برای نمونه‌های آب‌میوه هلوی ایرانی در کرنش 50 معکوس ثانیه بر حسب دما و غلظت

دما ($^{\circ}\text{C}$)	غلظت (درجه بریکس)	η_{50} (Pa.s)
5	25	2/27
	20	1/3
	15	0/51
	10	0/25
	5	0/053
25	25	1/79
	20	1/01
	15	0/39
	10	0/19
	5	0/045
45	25	0/03
	20	0/15
	15	0/32
	10	0/83
	5	1/48
65	25	1/29
	20	0/71
	15	0/27
	10	0/13
	5	0/025

معادل تنش برش اعمالی در شرایط هضم در دهان در نظر گرفته می‌شود [6]. جاسزاک و فورتونا (2003)، رفتار نیوتنی را برای عصاره توت فرنگی در گستره دمایی 10 تا 65 درجه سانتی‌گراد و غلظت 50 تا 67/1 درجه بریکس گزارش کردند که ویسکوزیته آن به شدت وابسته به دما و غلظت بود و بین 8/6 تا 541/2 میلی پاسکال ثانیه قرار داشت [15].

3-3- وابستگی به دما

وابستگی میزان ویسکوزیته ظاهری در سرعت برشی 50 معکوس ثانیه برای نمونه‌های آب‌میوه هلوی ایرانی در غلظت‌های مختلف به دما با استفاده از معادله آرنیوس-ارینگ (معادله 7) تعیین شد که نتایج آن در جدول (7) نشان داده شده است. مقدار ویسکوزیته ظاهری مرجع (η_p) در هر دما مقدار ویسکوزیته ظاهری در بریکس 5 در نظر گرفته شد که بر این اساس مقادیر انرژی اکتیواسیون محاسبه شده در غلظت‌های 5، 10، 15، 20 و 25 درجه بریکس به ترتیب 9/29، 8/46، 8/22، 7/93 و 7/42 کیلوژول بر مول بود. همان‌طور که نتایج جدول (6) نشان می‌دهد با افزایش بریکس مقدار انرژی اکتیواسیون (E_a) یا میزان حساسیت دمایی ویسکوزیته کاهش می‌یابد، به طوری که با افزایش غلظت از 5 به 10، 15، 20 و 25 مقدار انرژی اکتیواسیون به ترتیب 8/93، 11/52،

نتایج وابستگی مقدار ویسکوزیته ظاهری نمونه‌های آب‌میوه هلوی ایرانی را به غلظت در دماهای مختلف و در همین کرنش را بیان می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، هر دو مدل برازش خوبی با داده‌های ویسکوزیته-غلظت داشتند، ولی مدل قانون توانی به دلیل ضریب تبیین بالاتر (0/997) و مقدار جذر میانگین مربعات خطای کم‌تر (0/031-0/059) دارای برازش بهتری بود. تغییرات پارامترهای مدل قانون توانی نشان می‌دهد که با افزایش دما مقدار a_1 کاهش و مقدار b_1 افزایش می‌یابد، ولی از آنجایی که اثر پارامتر b_1 در مقدار نهایی ویسکوزیته بیش‌تر است، می‌توان گفت که با افزایش دما وابستگی به غلظت افزایش می‌یابد. با افزایش دما از 5 به 65 درجه سانتی‌گراد، مقدار a_1 75 درصد کاهش ولی مقدار b_1 6/17 درصد افزایش یافت که نشان دهنده اثر بیش‌تر افزایش دما بر پارامتر a_1 بود. همان‌طور که نتایج مدل‌سازی‌های رئولوژیکی نیز نشان دادند، افزایش غلظت سبب افزایش ویسکوزیته می‌شود. بر اساس داده‌های آزمایشگاهی در دمای 25 درجه سانتی‌گراد، افزایش غلظت از 5 به 10، 15، 20 و 25 درجه بریکس به ترتیب سبب افزایش 324/44، 771/11، 2151/11 و 3877/78 درصدی در ویسکوزیته ظاهری در تنش برشی 50 معکوس ثانیه گردید. لازم به ذکر است که دلیل انتخاب ویسکوزیته ظاهری در تنش برشی 50 معکوس ثانیه این بود که این تنش برشی

جدول (6) وابستگی ویسکوزیته ظاهری نمونه‌های آب‌میوه هلوی ایرانی به غلظت در دماهای مختلف (کرنش 50 معکوس ثانیه)

مدل قانون توانی				
دما (°C)	a_1 (Pa.s)	b_1	R^2	RMSE
5	0/0004	2/660	0/997	0/059
25	0/0003	2/709	0/997	0/047
45	0/0002	2/742	0/997	0/036
65	0/0001	2/824	0/997	0/031
مدل تابع نمایی				
دما (°C)	a_2 (Pa.s)	b_2	R^2	RMSE
5	0/072	0/139	0/989	0/111
25	0/054	0/140	0/990	0/084
45	0/043	0/142	0/989	0/070
65	0/035	0/145	0/992	0/055

14/63 و 20/13 درصد کاهش نشان می‌دهد. مقادیر بالای ضریب تبیین (0/940-0/998) و همچنین مقادیر پایین جذر میانگین خطاهای به دست آمده (0/013-0/085)، کارایی بالای مدل آرنیوس-ارینگ را در بیان روند تغییرات ویسکوزیته با دمای بیان می‌کند. بر اساس مدل ترکیبی قانون توانی-آرنیوس، معادله زیر برای اثر غلظت-دما بر ویسکوزیته ظاهری تعیین گردید:

$$\eta_{50} = 1.33 \times 10^{-5} (C)^{2.71} \exp\left(\frac{924.30}{T}\right) \quad (8)$$

که در این معادله η_{50} مقدار ویسکوزیته ظاهری در سرعت برش 50 معکوس ثانیه، C غلظت بر حسب درجه بریکس و T دما بر حسب درجه کلون است. مقدار ضریب تبیین (R^2) و جذر میانگین مربعات خطاهای (RMSE) به دست آمده برای معادله فوق به ترتیب 0/997 و 0/040 بود که کارایی بالای آن را نشان می‌دهد. خلیل و همکاران (1989)، خصوصیات رئولوژیکی عصاره موز پکتین زدایی شده در گستره دمایی 70-30 درجه سانتی‌گراد و بریکس 30-79/7 را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که آب میوه موز، در تمامی غلظت‌ها، رفتار نیوتنی نشان می‌دهد. همچنین، مدل آرنیوس تطابق خوبی با داده‌های ویسکوزیته-دما داشت و مقادیر انرژی فعال سازی 18/66-5/99 کیلوکالری بر مول بسته به دما به دست آمد. مدل ترکیبی قانون توانی-آرنیوس برای اثر غلظت-دما بر ویسکوزیته ظاهری، تطابق بالایی را نشان داد [16]. ایبارز و همکاران (1994)، رفتار رئولوژیکی آب پرتقال پکتین زدایی شده را در گستره وسیعی از دما، 70-5 درجه سانتی‌گراد و غلظت 30/7 تا 63/5 درجه بریکس مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این محققین نشان داد که آب پرتقال شفاف، رفتار نیوتنی دارد و بسته به غلظت، مقادیر انرژی

فعال سازی محاسبه شده مطابق با معادله آرنیوس برای توصیف اثر دما بر ویسکوزیته، بین 4/3 تا 9/59 کیلوکالری بر مول بود [14]. وندرسن و همکاران (2009)، ویژگی‌های رئولوژیکی آب هویج پاستوریزه نشده و پاستوریزه شده را در محدوده دمایی 80-8 درجه سانتی‌گراد توسط مدل‌های مختلف مورد مطالعه قرار دادند. آب هویج تیمار نشده، برازش خوبی با مدل نیوتنی نشان داد ولی نوع پاستوریزه شده رفتار سودوپلاستیک بالایی داشت و با تمامی مدل‌ها به جز مدل نیوتنی، برازش مناسبی نشان داد [17]. مقدار انرژی فعال سازی تعیین شده برای آب هویج غیر پاستوریزه و پاستوریزه به ترتیب 3/66 و 3/07 کیلوژول بر مول بود که این مقادیر کم‌تر از مقادیر محاسبه شده در این پژوهش برای آب میوه هلوی ایرانی بود.

4- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که عصاره کدر هلو، در تمام دامنه غلظت و دمای مورد آزمایش دارای رفتار سودوپلاستیک است. در بین مدل‌های استفاده شده، مدل قانون توانی دارای بالاترین کارایی در پیش‌بینی روند رفتار جریان برشی پایای نمونه‌های آب میوه هلوی ایرانی بود و پارامترهای این مدل (n و k) تحت تاثیر غلظت و دما بودند. مطالعه تغییراتی که در این پارامترها تحت اثر دما و غلظت روی می‌دهد، می‌تواند کمک زیادی در طراحی محصولات آب میوه با ویسکوزیته‌های مناسب برای افراد مختلف کند و از سویی دیگر طراحی صحیح نحوه فراوری آب میوه‌ها را می‌تواند در پی داشته باشد. همان‌طور که مشاهده شد مدل ترکیبی قانون توانی-آرنیوس برای بیان اثر غلظت-دما بر ویسکوزیته ظاهری (η_{50})، تطابق بالایی را نشان داد که از آن می‌توان برای پیش‌بینی ویسکوزیته تحت اثر هم‌زمان غلظت و دما استفاده نمود.

جدول (7) وابستگی ویسکوزیته ظاهری نمونه‌های آب میوه هلوی ایرانی به دما در غلظت‌های مختلف (کرنش 50 معکوس ثانیه)

غلظت (درجه بریکس)	E_a (kJ/mol)	R^2	RMSE
5	9/29	0/940	0/085
10	8/46	0/993	0/024
15	8/22	0/997	0/014
20	7/93	0/998	0/013
25	7/42	0/993	0/020

منابع

- [10] Keshani, S., Luqman Chuah, A., Russly, A.R. (2012). Effect of temperature and concentration on rheological properties pomelo juice concentrates. *Int. Food Res. J.*, 19, 553-562.
- [11] Ahmed, J., Ramaswamy, H.S., Sashidhar, K.C. (2007). Rheological characteristics of tamarind (*Tamarindus indica* L.) juice concentrates. *LWT-Food Sci. Technol.*, 40(2), 225-231.
- [12] Quek, M.C., Chin, N.L., Yusof, Y.A. (2013). Modelling of rheological behaviour of soursop juice concentrates using shear rate-temperature-concentration superposition. *J. Food Eng.*, 118(4), 380-386.
- [13] Yousefi, A.R., Razavi, S.M.A., Mohebbi, M., Norouzi, A., Akbarzade Totonchi, M.R. (2016). Some physicochemical and rheological attributes of phosphorylated and hydroxypropylated wheat starches. *Iranian Food Sci. Technol. J.*, 58, 145-160.
- [14] Ibarz, A., Gonzalez, C., Esplugas, S. (1994). Rheology of clarified fruit juices. III: orange juices. *J. Food Eng.*, 21, 485-494.
- [15] Juszczak, L., Fortuna, T. (2003). Viscosity of concentrated strawberry juice: effect of temperature and soluble solids content. *Electro. J. Polish Agric. Univ.*, 6, 241-250.
- [16] Khalil, K.E., Ramakrishna, P., Nanjundaswamy, A.M., Patwardhan, M.V. (1989). Rheological behavior of clarified banana juice: effect of temperature and concentration. *J. Food Eng.*, 10, 231-240.
- [17] Vandresen, S., Quadri, M.G.N., de Souza, J.A.R., Hotza, D. (2009). Temperature effect on the rheological behavior of carrot juices. *J. Food Eng.*, 92, 269-274.
- [1] USDA. 2015. National Nutrient Database for Standard Reference. <http://ndb.nal.usda.gov/>.
- [2] Koocheki, A., Razavi, S.M.A. (2009). Effect of concentration and temperature on flow properties of *Alysicum homolocarpum* seed gum solutions: Assessment of time dependency and thixotropy. *Food Biophys.*, 4, 353-364.
- [3] Yousefi, A.R., Razavi, S.M.A. (2015). Dynamic rheological properties of wheat starch gels as affected by chemical modification and concentration. *Starch/Stärke*, 67, 567-576.
- [4] Yousefi, A.R., Razavi, S.M.A., Khodabakhsh Aghdam, SH. (2014). The influence of temperature, mono- and divalent cations on dilute solution properties of sage seed gum. *Int. J. Biol. Macromol.*, 67, 246-253.
- [5] Goula, A.M., Adamopoulos, K.G. (2011). Rheological models of kiwifruit juice for processing applications. *J. Food Process Technol.*, 2, 100-106.
- [6] Yousefi, A.R., Razavi, S.M.A. (2015). Steady shear flow behavior and thixotropy of wheat starch gel: impact of chemical modification, concentration and saliva addition. *J. Food Process Eng.*, Doi: 10.1111/jfpe.12196.
- [7] Ramos, A.M., Ibarz, A. (1998). Thixotropy of orange concentrate and quince puree. *J. Texture Stud.*, 29, 313-324.
- [8] Tavares, D.T., Alcantarab, M.R., Tadini, C.C., Telis-Romeroc, J. (2007). Rheological properties of frozen concentrated orange juice (FCOJ) as a function of concentration and subzero temperatures. *Int. J. Food Prop.*, 10, 829-839.
- [9] Augusto, P.E.D., Falguera, V., Cristianini, M., Ibarz, A. (2011). Influence of fiber addition on the rheological properties of peach juice. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 46, 1086-1092.