

(مقاله پژوهشی)

تعیین و مدلسازی ویژگی های رئولوژیکی عصاره کدو تنبل (*Cucurbita maxima*)محسن مختاریان^{*}، مرجان نوری^۱

۱- گروه علوم و صنایع غذایی، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۹

چکیده

جهت ارزیابی پارامترهای رئولوژیکی کنسانتره کدوی تنبل با غلظت های ۳۵، ۵۰ و ۶۵ درجه بریکس و دماهای ۳۵، ۴۵ و ۶۵°C، از یک ویسکومتر چرخشی استفاده شد. سپس مدل های ریاضی مختلف شامل اُسوالد-دی آل (سیال قانون توان)، بینگهام، کاسون پلاستیک، هرشل بالکلی، کاسون اصلاح شده و سیسکو، به منظور تعیین ویژگی های جریانی کنسانتره کدوی تنبل بکار گرفته شد. نتایج نشان داد که کنسانتره کدوی تنبل در دامنه غلظت و دمای به ترتیب ۳۵-۶۵ درجه بریکس و ۳۵-۶۵°C دارای رفتار غیرنیوتنی و رقیق شونده با برش ($n < 1$) است. رابطه تنش برشی و آهنگ برشی کنسانتره کدوی تنبل نشان داد که، فقط مدل کاسون اصلاح شده توانست پارامترهای رئولوژیکی کنسانتره کدوی تنبل را توصیف نماید. محاسبات ریاضی نشان داد که پارامترهای ضریب قوام و شاخص رفتار جریان کنسانتره کدوی تنبل به ترتیب وابسته به دما و مستقل از زمان بودند. رابطه آرنیوس نشان داد که انرژی فعالسازی (E_a) کنسانتره کدوی تنبل به دو فاکتور مهم غلظت و گرانیوی ظاهری وابسته بوده و در دامنه ۰/۰۷۶ تا ۲۰/۳۴ kJ/mol تغییر می کند. معادلات توانی و نمایی به طور کافی تأثیر غلظت را روی گرانیوی ظاهری کنسانتره کدوی تنبل بیان نمودند. با این حال، رابطه نمایی برازش بهتری در توصیف رفتار یاد شده داشت.

واژه های کلیدی: کدو تنبل، انرژی فعالسازی، سیال غیرنیوتنی، کنسانتره، مدلسازی رئولوژیکی.

۱- مقدمه

کدوی تنبل (*Cucurbita maxima*) از جمله محصولات فصلی بوده که اهمیت زیادی برای مصارف انسانی دارد. طبق آمار رسمی اعلام شده توسط سازمان خواروبار جهانی (FAO)، در حال حاضر این محصول در کشورهای چین (۴۴/۷۴٪ تولید جهانی)، هند (۱۵/۳۵٪ تولید جهانی)، روسیه (۳/۷۹٪ تولید جهانی)، اُکراین (۳/۳۹٪ تولید جهانی)، آمریکا (۲/۶۶٪ تولید جهانی)، ایران (۱/۸۶٪ تولید جهانی) و سایر کشورها (۱۲/۴۸٪ تولید جهانی) در سطح وسیعی کشت می‌شود (۱). با توجه به تولید قابل توجه این محصول در ایران و مشکلات عمده و بسیار در رابطه با انبارمندی، بسته‌بندی، حمل‌ونقل، ضایعات و نیز فصلی بودن این محصول، نیاز به راه‌اندازی و احداث صنایع جانبی و تبدیلی (نظیر واحد تولید کنسانتره) در کشور بیش از پیش احساس می‌گردد. به طوری که توسعه هر چه بیشتر پرورش این محصول و فرآورده‌های حاصل از آن بتواند باعث رشد صادرات غیرنفتی، ارزآوری و در نهایت افزایش توان اقتصادی کشور گردد. بررسی مطالعات پیشین نشان داد که تاکنون هیچ پژوهشی روی ویژگی‌های رئولوژیکی و رفتار جریان‌ی کنسانتره کدوی تنبل صورت نگرفته است. مقادیر و ویژگی‌های رئولوژیکی کنسانتره کدوی تنبل به ما کمک می‌کند تا محاسبات مهندسی متعددی (نظیر اُفت فشار در لوله‌ها، انتقال حرارت، پیش‌بینی زمان ماند، انتقال مواد، دینامیک سیالات محاسباتی، سنجش تنش تسلیم و غیره) که در خطوط فرآوری این محصول، در مقیاس زیاد (تولید انبوه) وجود دارد را بتوانیم حل نماییم. به علاوه، شناسایی ویژگی‌های رئولوژیکی می‌تواند در انتخاب تجهیزات فرآوری، کنترل فرآیندهای مختلف (نظیر اختلاط، همزن، تصفیه، تغلیظ، بسته‌بندی و تعلیق)، پیش‌بینی الزامات انرژی و ارزیابی حسی مناسب فرآورده مفید واقع شود. برخی از پژوهش‌های مرتبط با تولید کنسانتره و ویژگی‌های رفتار جریان‌ی محصولات غذایی در ادامه مرور می‌شود. ماکرو و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر مواد جامد محلول و میزان اسید

(اسید سیتریک) را روی رفتار رئولوژیکی پوره انبه مطالعه نمودند. نتایج نشان داد که افزودن اسید (جهت رهايش بهتر آب از بافت انبه اضافه شد) منجر به افزایش مدول ذخیره (G') و مدول اُفت (G'') شد، در حالی که، این مدول‌ها تا غلظت ۲۲ درجه بریکس مواد جامد محلول، افزایشی بودند، سپس با افزایش غلظت مواد جامد محلول کاهش یافتند (۲). مارتین پادایلا و همکاران (۲۰۱۷) ویژگی‌های ویسکوالاستیک پوره آووکادو را برای کاربردهای طراحی فرآیند مشخص نمودند. مدول‌های ذخیره (G') و اُفت (G'') پوره آووکادو، رفتار شبه جامد را بدون توجه به نوع تیمار به کار رفته، نشان داد (۳). شارما و همکاران (۲۰۱۷) تأثیر نوع هیدروکلئید (نشاسته اصلاح شده، زانتان، کاراگینان، کربوکسی متیل سلولز، پکتین و ژلان) را روی بافت پوره هویج مورد مطالعه قرار دادند. پوره تهیه شده با کاراگینان، دارای ساختار سخت بود و مستعد قطعه قطعه شدن بود، در حالی که پوره تهیه شده با کربوکسی متیل سلولز، ساختار ژلی ضعیفی داشت. همچنین پوره تهیه شده با پکتین دارای ساختار ژلی قوی بود. به طور کلی آن‌ها بیان داشتند که پوره هویج تهیه شده با هیدروکلئیدهای مختلف دارای رفتار جریان‌ی رقیق شونده با برش بود (۴) کوک و همکاران (۲۰۱۳) مدل‌سازی رفتاری رئولوژیکی کنسانتره میوه ساپادیل^۱ را مورد بررسی قرار دادند. آنها تأثیر دما (۱۰ تا ۷۰°C) و غلظت (۱۰ تا ۵۰ درجه بریکس) را در دامنه سرعت برشی صفر تا ۴۰۰ s⁻¹ بر روی رفتار این کنسانتره مطالعه نمودند و اذعان داشتند که مدل قانون توان بهترین مدل برای برآش داده‌های رئولوژیکی این محصول است. آن‌ها بیان نمودند که این کنسانتره هر دو رفتار رقیق شونده و غلیظ شونده با برش را از خود نشان می‌دهد (۵). ماگزامو و همکاران (۲۰۰۷) تأثیر دما (۲۰ تا ۹۰°C)، غلظت (۲۰ تا ۴۰ درجه بریکس) و فشار (۰/۱۰۱۳۲۵ تا ۱۰ MPa) را روی گرانیوی کنسانتره‌های انار و گلابی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش دما سبب کاهش گرانیوی گردید. همچنین نتایج نشان داد که افزایش فشار در یک دمای ثابت (به عنوان مثال

داخل بافت کدو طی فرآیند استخراج، گوشته میوه توسط یک رنده خانگی به قطعات حدوداً $1 \times 3 \times 0.1$ سانتی‌متر (طول، عرض و ضخامت) برش داده شد (این عمل توسط رنده خانگی صورت گرفت). سپس برش‌ها با نسبت‌های مشخصی از حلال (نسبت گوشته به حلال ۱:۱، ۲:۱ و ۳:۱) مخلوط شدند (جدول ۱). عمل استخراج به مدت ۲ ساعت در گستره دمایی 55°C تا 85°C انجام شد (جدول ۱). جهت تنظیم دما طی عمل استخراج، بشرهای حاوی گوشته میوه و حلال در بین‌ماری (Windaus, Lauda E200، آلمان) قرار گرفتند. سپس آمیخته فوق به منظور یکنواخت شدن توسط همزن شیشه‌ای همگن شد ($15 \text{ min}/2 \text{ rev}$). پس از این مرحله آمیخته همگن شده توسط پارچه متقال صاف گردید. لازم به ذکر است که بسته به میزان عصاره لازم، مراحل فوق مجدداً به همان ترتیب صورت گرفت (۸، ۹). جهت بهینه‌یابی فرآیند استخراج عصاره از بافت کدو تنبل از روش آماری سطح پاسخ استفاده گردید. در فرآیند بهینه‌یابی دمای استخراج (X_1) و نسبت اختلاط گوشته به حلال (X_2) به عنوان متغیرهای مستقل فرآیند و راندمان استخراج عصاره (Y_1)، ویتامین C (Y_2)، هیدروکسی متیل فورفورال (Y_3)، بتا-کاروتن (Y_4) و روبش رادیکال آزاد DPPH (Y_5) به عنوان پاسخ‌ها در نظر گرفته شدند. مقادیر واقعی و کُد شده متغیرهای مستقل مورد استفاده در این فرآیند در جدول (۱) ارائه شده است.

90°C) سبب افزایش جزئی در گرانیوی از 0.435 تا 0.440 mPa.s گردید (۶). هدف از این مطالعه تعیین گرانیوی، ویژگی‌های رئولوژیکی و انرژی فعالسازی جهت پیش‌بینی عمر ماندگاری فرآورده در دمای انبارمانی و کنترل واکنش‌های شیمیایی نامطلوب نظیر قهوه‌ای شدن و تخریب ترکیبات زیست فعال کنسانتره کدوی تنبل است. این داده‌ها در بهینه‌یابی فرآیندهای مختلف مورد نیاز جهت حفظ کیفیت بالای کنسانتره کدوی تنبل ضروری است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- آماده‌سازی ماده اولیه

در این مطالعه رقم گرد کدو (کدو تنبل) از بازار محلی شهر رودهن خریداری شد. سپس به منظور کاهش فعالیت‌های تنفسی و بیولوژیکی تا زمان انجام آزمایشات در یخچال در دمای 3°C تا 4°C نگهداری گردید. رطوبت اولیه کدوی تنبل به روش آون‌گذاری در دمای 105°C ارزیابی و مقدار آن معادل $78.9/3.1$ (مبنای مرطوب) تعیین شد (۷).

۲-۲- بهینه‌یابی فرآیند استحصال عصاره

بدین منظور ابتدا ۲ عدد کدو تنبل (وزن متوسط واحد هر کدام به طور تقریبی $6/5 \text{ kg}$) پوست‌گیری و دانه‌های موجود در آن خارج شد. سپس جهت حذف بخش‌های زائد باقیمانده روی گوشته میوه، گوشته با آب سرد شستشو شد. به منظور نفوذ بهتر حلال (آب) به

جدول ۱- متغیرهای مستقل مورد استفاده جهت بهینه‌یابی فرآیند استحصال عصاره از بافت کدو تنبل

متغیر مستقل	مقادیر واقعی (مقادیر کُد شده)		
	پایین	حد واسط	بالا
دمای استخراج (X_1) ($^{\circ}\text{C}$)	55 (-1)	70 (0)	85 (+1)
نسبت اختلاط گوشته به حلال (X_2) (-)	1:1 (-1)	2:1 (0)	3:1 (+1)

۲-۳- تغلیظ عصاره استحصال شده و تولید کنسانتره

بعد از فرآیند بهینه‌یابی استحصال عصاره از بافت کدوی تنبل، عصاره در شرایط بهینه استخراج و توسط دستگاه تبخیرکننده چرخان (Laboratorium-Technic AG، سوئیس) تا رسیدن به غلظت‌های ۳۵، ۵۰ و ۶۵ درجه بریکس در دماهای ۳۵°C، ۴۵°C و ۶۵°C تغلیظ گردید (۸، ۹). کنسانتره تولید شده برای آزمون‌های بعدی و حفظ خصوصیات کیفی در یخچال در دمای ۴°C، نگهداری گردید.

۲-۴- آزمون‌های کیفی

۲-۴-۱- راندمان استخراج

راندمان استخراج از طریق معادله (۱) تعیین گردید:

$$EY(\%) = \frac{X_{se}}{X_{si}} \times 100 \quad (1)$$

که در آن، EY بازده استخراج (%)، X_{se} مواد جامد عصاره استخراج شده بعد از خشک کردن (%)، X_{si} مواد جامد برش‌های کدوی اولیه بعد از خشک کردن (%). می‌باشد (۸).

۲-۴-۲- ارزیابی ویتامین ث

به منظور بررسی اثرات فرآیند بر ارزش تغذیه‌ای محصول نهایی، مقدار ویتامین ث به عنوان شاخصی از کیفیت تغذیه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. بنابراین مقدار ویتامین ث در نمونه‌های آزمایشی با استفاده از روش شیمیایی ۲،۶-دی کلروفلن ایندوفنل طبق استاندارد ملی ایران به شماره ۵۶۰۹ اندازه‌گیری شد (۱۰).

۲-۴-۳- ارزیابی هیدروکسی متیل فورفورال (HMF)

بدین منظور مقدار ۲۵ g نمونه به یک بالن مدرج (۵۰ ml) منتقل شد و جهت قلیایی شدن نمونه (pH=۷-۸) به آن بی‌کربنات سدیم جامد اضافه گردید. برای جلوگیری از کف کردن نمونه

چند قطره ایزوپروپانل افزوده شد. سپس مقدار ۴ ml محلول نشاسته ۰/۵٪ افزوده شد. در مرحله بعد چند قطره معرف ید ۰/۱ نرمال به محلول فوق اضافه شد بطوریکه رنگ آبی پایدار ایجاد شود (به مدت ۱۵ ثانیه ثابت بماند). در ادامه مقدار ۱ ml از هر یک از محلول‌های شفاف‌کننده فروسیانید روی (a) و (b) به محلول اضافه شد. محلول آماده شده به خوبی مخلوط شد و توسط آب مقطر به حجم رسانده شد. سپس محلول توسط کاغذ صافی واتمن صاف گردید. دو ارلن انتخاب و به هر یک مقدار ۲ ml از محلول صاف شده فوق منتقل گردید. به ارلن شاهد ۵ ml محلول پاراتولوئیدین و ۱ ml آب مقطر اضافه و مخلوط شد. چگالی نوری مخلوط در طول موج ۵۵۰ nm توسط دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شد (A_B). همچنین به ارلن نمونه ۵ ml محلول پاراتولوئیدین و ۱ ml اسید تیوباریتوریک اضافه شد و چگالی نوری آن در طول موج یاد شده ثبت شد (A_S). سپس مقدار هیدروکسی متیل فورفورال (HMF) از طریق رابطه (۲) محاسبه گردید:

$$HMF(\text{mg/kg}) = \frac{1920 \times (A_B - A_S)}{m}$$

که در آن، m وزن آزمون (g)، A_B جذب شاهد و A_S جذب نمونه است (۱۱).

۲-۴-۴- ارزیابی ظرفیت روبش رادیکال آزاد DPPH

فعالیت آنتی‌اکسیدانی عصاره توسط ارزیابی ظرفیت روبش رادیکال آزاد ۲،۲ دی فنیل ۱-پیکریل هیدرازیل^۳ (DPPH) مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، ابتدا بعد از تهیه عصاره در هر یک از تیمارها، عصاره مذکور (۲ g) با ۱۰۰ ml از حلال ترکیبی (شامل هگزان، استن و اتانول به ترتیب با نسبت‌های حجمی ۵۰:۲۵:۲۵) مخلوط شد تا ترکیبات ضداکسایشی استخراج شود

۱- شناساگر a : مقدار ۲۱/۹ g استات روی متبلور و ۳ ml اسید استیک غلیظ در ۱۰۰ ml آب مقطر حل و به حجم رسانده شد.

۲- شناساگر b : مقدار ۱۰/۶ g فروسیانید پتاسیم متبلور در ۱۰۰ ml آب مقطر حل و به حجم رسانده شد.

۳- جهت محلول‌سازی، جرم مولی رادیکال آزاد DPPH ($C_{18}H_{12}N_5O_2$) معادل ۳۹۴/۳۲ g/mol در نظر گرفته شد.

به ترتیب با نسبت‌های حجمی ۵۰:۲۵:۲۵) به ظرف فوق اضافه شد. مخلوط فوق به مدت ۳۰ min توسط همزن مغناطیسی به طور کامل مخلوط شد و سپس ۱۵ ml آب مقطر به منظور بهبود جداسازی فازها اضافه شد. با این عمل دو فاز تشکیل شد که فاز بالایی هگزان (شامل ترکیبات کاروتنوئیدی) و فاز پایینی آب (حاوی ترکیبات آبدوست یا هیدروفیلیک و ذرات معلق در سوسپانسیون) بود. مقدار ۱ ml از لایه فوقانی برای ارزیابی β -کاروتن استفاده شد (۱۲، ۱۳). بدین منظور از دستگاه اسپکتروفتومتر مرئی/UV استفاده شد، به طوری که ۱ ml از عصاره هگزانی حاوی ترکیبات کاروتنوئیدی به سیل (از جنس کوارتز) دستگاه اسپکتروفتومتر منتقل شد. سپس جذب نمونه در طول موج ۴۵۰ nm (طول موج بیشینه برای رنگدانه β -کاروتن) در مقابل حلال هگزان (به عنوان نمونه شاهد) قرائت شد. مقدار عددی β -کاروتن توسط رابطه (۴) تعیین گردید:

$$C(\text{mol/l}) = \frac{A_{\lambda} \times F \times d}{\epsilon} \quad (4)$$

در این معادله، C مقدار β -کاروتن (mol/l)، A_{λ} بیشینه جذب رنگدانه β -کاروتن (mol/l)، F فاکتور رقت تعدیل شده برای استخراج، ϵ ضریب خاموشی مولی در حلال هگزان (برای رنگدانه β -کاروتن برابر ۱۳۹۰۰۰ l/mol است) و d عرض سیل یا کاووت (۱ cm) است. با بکارگیری وزن مولکولی رنگدانه β -کاروتن (۵۳۷ g/mol)، نتایج بر حسب (mg/l یا ppm) تبدیل شد (۱۳).

۲-۵-۲-آزمون رئولوژیکی

۲-۵-۱- تعیین پارامترهای رئولوژیکی

پارامترهای رئولوژیکی کنسانتره کدوی تنبل توسط ویسکومتر چرخشی مدل بروکفیلد (Brookfield R/S-CC25 Rheometer, Middleboro, MA, USA) مجهز به محفظه سنجنش استوانه‌ای هم مرکز اندازه‌گیری شد (۱۶، ۱۷). قبل از انجام آزمون رئولوژیکی، به منظور محدود نمودن جداسازی سیرم و پالپ و نیز حذف حباب‌های احتمالی هوا، کنسانتره کدوی تنبل چندین بار توسط بهمزن شیشه‌ای همزده شد و پس از ۱۰ min استراحت، تحت

(۱۲، ۱۳، ۱۴). میزان ۳ ml از مخلوط یاد شده به لوله آزمایش منتقل و سپس مقدار ۱/۵ ml معرف DPPH تازه تهیه شده (یعنی فعالیت آنتی‌اکسیدانی عصاره توسط ارزیابی ظرفیت روبش رادیکال آزاد ۲ و ۲ دی فیل ۱-پیکریل هیدرازیل^۱ (DPPH) مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، ابتدا بعد از تهیه عصاره در هر یک از تیمارها، عصاره مذکور (۲ g) با ۱۰۰ ml از حلال ترکیبی (شامل هگزان، استن و اتانول به ترتیب با نسبت‌های حجمی ۵۰:۲۵:۲۵) مخلوط شد تا ترکیبات ضداکسایشی استخراج شود (۱۲، ۱۳، ۱۴). میزان ۳ ml از مخلوط یاد شده به لوله آزمایش منتقل و سپس مقدار ۱/۵ ml معرف DPPH تازه تهیه شده (یعنی محلول ۰/۱ mM که از اختلاط ۰/۰۰۳۹ g معرف در ۱۰۰ ml متانول و به حجم رساندن محلول تهیه شد)، به لوله اضافه و توسط هم‌زن لوله‌ای به مدت ۳۰ ثانیه، به خوبی ورتکس شد. در انتها جذب محلول فوق بعد از ۳۰ min قرار گرفتن در محیط تاریک (در دمای محیط)، توسط اسپکتروفتومتر UV، در طول موج ۵۱۷ nm اندازه‌گیری شد. جهت تهیه محلول شاهد از ۳ ml حلال ترکیبی به جای عصاره استفاده شد (یعنی ۳ ml حلال ترکیبی+ ۱/۵ ml رادیکال DPPH). ظرفیت روبش رادیکالی (RSA) یا قدرت مهارکنندگی رادیکالی، با استفاده از رابطه (۳) محاسبه گردید (۱۵).

$$RSA(\%) = \left(\frac{A_B - A_S}{A_B} \right) \times 100 \quad (3)$$

در این معادله، A_S میزان جذب نمونه (عصاره+رادیکال DPPH) و A_B میزان جذب شاهد (حلال ترکیبی+رادیکال DPPH) است.

۲-۵-۴-ارزیابی رنگدانه β -کاروتن

به منظور استخراج ترکیبات کاروتنوئیدی موجود در عصاره کدو، حدود ۲ g نمونه توزین و به یک ظرف فویل پیچ شده (به منظور محافظت در برابر نور) منتقل گردید. سپس مقدار ۱۰۰ ml از ترکیبی از حلال‌های استخراج‌کننده (شامل هگزان، استن و اتانول

۱- جهت محلول‌سازی، جرم مولی رادیکال آزاد DPPH ($C_{18}H_{12}N_2O_4$) معادل ۳۹۴/۳۲ g/mol در نظر گرفته شد.

با در نظر گرفتن $Y = \ln \eta$ و $X = \ln(4\pi N)$ و ترسیم نمودار Y بر حسب X ، پارامترهای رئولوژیکی کنسانتره کدوی تنبل با استفاده از رگرسیون خطی از طریق شیب $(n-1)$ و عرض از مبدأ $(\ln K - (n-1) \ln n)$ معادله خط (رابطه ۸) قابل محاسبه می‌باشد. با جانمایی مقادیر شاخص رفتار جریان و ضریب پایداری در معادله (۵)، مقدار تنش برشی (τ) برای هر آهنگ برشی ($\dot{\gamma}$) قابل محاسبه است.

۲-۵-۲- وابستگی دما و غلظت روی پارامترهای رئولوژیکی و انرژی فعالسازی

دو حالت معادله آرنیوس (معادلات ۹ و ۱۰) جهت ارزیابی تأثیر دما روی گرانروی ظاهری کنسانتره کدوی تنبل استفاده شد.

$$\eta = \eta_o \Big|_{\dot{\gamma}=cte} \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (9)$$

$$\ln \eta = \ln \eta_o \Big|_{\dot{\gamma}=cte} + \left(\frac{E_a}{R}\right) \times \frac{1}{T} \quad (10)$$

در این معادلات، $\eta_o \Big|_{\dot{\gamma}=cte}$ ضریب پیش‌نمایی آرنیوس در یک آهنگ برشی ثابت $(Pa \cdot s^n)$ ، E_a انرژی فعالسازی (kJ/mol) ، T دمای مطلق (K) و R ثابت جهانی گاز $(8.314 kJ/kmol \cdot K)$. انرژی فعالسازی و ثابت پیش‌نمایی کنسانتره کدوی تنبل با رسم $\ln \eta$ در برابر عکس دمای مطلق $(1/T)$ بدست آمد (۵). معادله قانون توان (رابطه ۱۱) و نمایی (رابطه ۱۲) جهت ارزیابی تأثیر غلظت کنسانتره کدوی تنبل روی گرانروی ظاهری (η) استفاده شد.

$$\eta = \eta_1 \exp(B_1 C) \quad (11)$$

$$\eta = \eta_2 C^{B_2} \quad (12)$$

در معادلات (۱۱) و (۱۲)، η_1 ، η_2 ، B_1 و B_2 ، ثابت‌های نسبی هستند.

آزمون قرار گرفت. آزمون‌های رئولوژیکی در سه سطح دمایی $(35^\circ C, 45^\circ C$ و $65^\circ C)$ و سه سطح غلظت $(35, 50$ و 65 درجه بریکس) اندازه‌گیری شد. در هر یک از دماها و غلظت‌های یاد شده، حدوداً مقدار $17ml$ کنسانتره کدوی تنبل در فنجان استوانه‌ای هم‌مرکز ویسکومتر قرار گرفت. تنظیم دما در دستگاه توسط جریان آب با دمای ثابت که توسط بن‌ماری تأمین می‌گردید، کنترل شد. ویسکومتر در بازه آهنگ برشی صفر تا $1000 s^{-1}$ تنظیم گردید و پارامترهای تنش برشی و گرانروی ظاهری مستقیماً توسط برنامه کامپیوتری دستگاه و به صورت یک فایل خروجی اکسل روی رایانه ذخیره شد. جهت تعیین پارامترهای رئولوژیکی کنسانتره کدوی تنبل، ابتدا با استفاده از گرانروی ظاهری (η) و سرعت چرخشی (rpm) ثبت شده توسط دستگاه ویسکومتر و با فرض پیروی کنسانتره کدوی تنبل از رابطه قانون توان^۱ (رابطه ۵)، ضریب پایداری (K) و شاخص رفتار جریان (n) محاسبه گردید.

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (5)$$

گرانروی ظاهری با بکارگیری رابطه (۶) تعیین شد:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{K \dot{\gamma}^n}{\dot{\gamma}} = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (6)$$

آهنگ برشی (s^{-1}) یاد شده در معادله (۶)، برای یک سیال قانون توان و در یک ویسکومتر دورانی به صورت زیر بیان می‌شود (۱۸).

$$\dot{\gamma} = \frac{2\omega}{n} = \frac{4\pi N}{n} \quad (7)$$

با بکارگیری معادلات (۶) و (۷) و گرفتن لگاریتم طبیعی معادله (۸) بدست خواهد آمد:

$$\ln \eta = \ln K - (n-1) \ln n + (n-1) \ln(4\pi N) \quad (8)$$

در این معادلات، τ تنش برشی (Pa) ، K ضریب پایداری $(Pa \cdot s)$ ، $\dot{\gamma}$ آهنگ برشی (s^{-1}) ، n شاخص رفتار جریان (بدون بُعد)، η گرانروی ظاهری $(Pa \cdot s)$ ، ω سرعت دورانی^۲ (هرتز یا دور بر ثانیه) و N سرعت چرخشی اسپیندل (rps) است.

1- Power Low

2- Rotational Speed

$$\sqrt{\tau} = \tau_0 + K_c \dot{\gamma}^n \quad (19)$$

$$\tau = A\dot{\gamma} + B\dot{\gamma}^n \quad (20)$$

برخی از مهمترین شاخص‌های آماری نظیر ضریب تبیین (R^2)، کاهش کی-اسکور (χ^2)، مدول انحراف نسبی میانگین ($P(\%)$) و ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) برای انتخاب بهترین مدل برازش‌کننده رئوگرام‌های کنسانتره کدوی تنبل، مورد استفاده قرار گرفت. معادلات (۲۱) تا (۲۴) برای محاسبه این شاخص‌ها استفاده شد. زمانیکه R^2 بیشینه و مقادیر χ^2 ، $P(\%)$ و $RMSE$ حداقل شود، مدل مربوطه به عنوان بهترین مدل است زیرا آن مدل از کیفیت برازش بالایی برخوردار است (۱۸).

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (\tau_{p,i} - \tau_{e,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{\tau}_{p,i} - \tau_{p,i})^2} \right] \quad (21)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\tau_{p,i} - \tau_{e,i})^2 \right)^{0.5} \quad (22)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\tau_{e,i} - \tau_{p,i})^2}{N - Z} \quad (23)$$

$$P(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^n |\tau_{p,i} - \tau_{e,i}| \quad (24)$$

در این معادلات، $\tau_{e,i}$ تنش برشی تجربی در $\dot{\gamma}$ آیین اندازه‌گیری، $\tau_{p,i}$ تنش برشی پیش‌بینی شده در $\dot{\gamma}$ آیین اندازه‌گیری، $\bar{\tau}_{p,i}$ میانگین تنش برشی پیش‌بینی شده، N تعداد مشاهده و Z تعداد ثابت‌های مدل می‌باشند.

معادلات (۱۳) و (۱۴) جهت مدل‌سازی تغییرات انرژی فعال‌سازی با غلظت کنسانتره کدوی تنبل مورد استفاده قرار گرفت. سپس حالت لگاریتمی این دو معادله برای تعیین ثابت‌های هر مدل استفاده شد.

$$E_a = A_1 \exp(b_1 C) \quad (13)$$

$$E_a = A_2 C^{b_2} \quad (14)$$

در این معادلات، پارامترهای A_1 ، A_2 ، b_1 و b_2 ثابت‌های نسبی هستند.

۲-۵-۳- مدل‌سازی رفتار جریان

داده‌های آزمایشی کنسانتره کدوی تنبل با چندین مدل رئولوژیکی مختلف با نام‌های مدل اُستوالد-دی-وال^۱ (رابطه ۱۵)، بینگهام^۲ (رابطه ۱۶)، کاسون پلاستیک^۳ (رابطه ۱۷)، هرشل بالکلی^۴ (۱۸)، کاسون اصلاح شده^۵ (رابطه ۱۹) و سیسکو^۶ (رابطه ۲۰) مورد برازش قرار گرفتند (۱۸). نرم‌افزار سیگما پلات^۷ نسخه ۱۲، برای برازش منحنی‌ها استفاده شد. روابط ریاضی مدل‌های مختلف برای یافتن تنش برشی ارائه شده در معادلات (۱۵) تا (۲۰) بکار رفت.

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (15)$$

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma} \quad (16)$$

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + K_c \sqrt{\dot{\gamma}} \quad (17)$$

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (18)$$

-
- 1 - Ostwald-de-Waele
 - 2 - Bingham
 - 3 - Casson Plastic
 - 4 - Herschel-Bulkley
 - 5 - Modified Casson
 - 6 - Sisko
 - 7 - SigmaPlot

۲-۶- تجزیه و تحلیل آماری

داده‌های تجربی با کمک یک مدل چند جمله‌ای درجه دوم برازش داده شدند. ارزیابی بهترین مدل از طریق بررسی آزمون فقدان برازش (LOF) و ضریب تبیین مدل (R^2) مذکور بود. بطوریکه مدلی که آزمون فقدان برازش را غیرمعنادار نماید به عنوان بهترین مدل انتخاب می‌گردد.

برای تجزیه و تحلیل آماری از طرح مرکب مرکزی شامل ۱۳ آزمایش با ۵ تکرار در نقاط مرکزی استفاده شد که تیمارهای آن در جدول (۲) ارائه شده است. جهت تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها از نرم‌افزار آماری Design Expert نسخه ۶/۰۱ استفاده گردید.

جدول ۲- تیمارهای بکار رفته جهت بهینه‌یابی فرآیند استحصال عصاره از بافت کدو تنبل

شماره تیمار	متغیرهای مستقل		متغیرهای وابسته			
	X_1	X_2	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
۱	۵۵	۱:۱	۴۳/۰۳	۰/۴۸۲	۰/۹۲۲	۰/۶۲۶
۲	۵۵	۲:۱	۳۰/۵۳	۰/۳۵۲	۰/۶۱۴	۰/۵۱۷
۳	۵۵	۳:۱	۲۱/۲۶	۰/۲۵۱	۰/۴۶۱	۰/۴۵۹
۴	۷۰	۱:۱	۴۱/۷۴	۰/۳۷۱	۱/۳۸۲	۰/۶۰۳
۵	۷۰	۲:۱	۲۸/۲۴	۰/۲۶۹	۱/۰۷۵	۰/۴۸۷
۶	۷۰	۲:۱	۲۷/۰۱	۰/۲۶۵	۱/۲۲۹	۰/۴۷۵
۷	۷۰	۲:۱	۲۷/۶۲	۰/۲۶۰	۰/۹۹۸	۰/۴۸۳
۸	۷۰	۲:۱	۲۷/۷۵	۰/۲۶۵	۱/۱۵۲	۰/۴۹۱
۹	۷۰	۲:۱	۲۷/۹۵	۰/۲۶۹	۰/۹۲۲	۰/۴۹۴
۱۰	۷۰	۳:۱	۲۰/۵۶	۰/۱۷۸	۰/۹۹۸	۰/۴۴۱
۱۱	۸۵	۱:۱	۴۱/۰۱	۰/۲۸۹	۲/۶۸۹	۰/۵۹۵
۱۲	۸۵	۲:۱	۲۷/۱۳	۰/۱۹۳	۱/۳۸۲	۰/۴۶۸
۱۳	۸۵	۳:۱	۱۹/۶۴	۰/۱۲۱	۱/۱۵۲	۰/۴۲۹

X_1 : دمای استخراج ($^{\circ}C$)، X_2 : نسبت اختلاط گوشته به حلال (-)، Y_1 : راندمان استخراج عصاره (%)، Y_2 : ویتامین C ($mg/100g$)، Y_3 : هیدروکسی متیل فورفورال (mg/kg)، Y_4 : بتا-کاروتن (mg/l) و Y_5 : روبش رادیکال آزاد DPPH (%).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی آزمون‌های فیزیکوشیمیایی طی فرآیند استحصال عصاره از بافت کدوی تنبل

همکاران (۱۳۸۹) در مطالعه‌ای گزارش نمودند که نسبت اختلاط و دمای فرآیند تأثیر معنی‌دار ($p < 0.01$) روی میزان راندمان استخراج کنسانتره کشمش دارد. آنها بیان نمودند که افزایش دمای استخراج از $40^{\circ}C$ تا $80^{\circ}C$ ، سبب افزایش ۲۱/۸٪ در راندمان استخراج عصاره گردید. همچنین نتایج این محققین نشان داد که افزایش نسبت استخراج از ۱:۱ تا ۳:۱ سبب کاهش ۴۴/۱٪ در مواد جامد محلول شد که با توجه به رابطه (۱)، با کاهش راندمان استخراج همراه است (۸). مدل تجربی (درجه دوم) بدست آمده (برای داده‌های واقعی) برای راندمان استخراج به صورت زیر است:

راندمان استخراج یکی از فاکتورهای مهم جهت بررسی میزان بهره‌وری محصول است. شکل (۱) اثر هم زمان دمای استخراج و نسبت اختلاط را روی میزان راندمان استخراج کدوی تنبل نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در یک دمای استخراج ثابت (مثلاً $70^{\circ}C$)، افزایش نسبت اختلاط از ۱:۱ تا ۳:۱ سبب کاهش میزان راندمان استخراج گردید (میزان کاهش ۴۹/۰۳٪). زمانی و

$$Y_1(\%) = +80.92 - 0.476 x_1 - 22.94 x_2 + 0.0066 x_1 x_2 + 0.0027 x_1^2 + 2.94 x_2^2$$

(رقیق شدن) که نتایج گزارش شده را به همراه دارد. از طرف دیگر، در یک نسبت اختلاط ثابت (۲:۱)، افزایش دمای استخراج از ۵۵°C تا ۸۵°C سبب کاهش میزان ویتامین ث شد. احتمالاً این حالت به دلیل اکسیداسیون برگشت‌ناپذیر ویتامین ث است (۲۰). در اثر حرارت اسید آسکوربیک (ویتامین ث) موجود در عصاره به دِهیدرو اسید آسکوربیک تغییر ساختار می‌دهد (۲۱). مدل تجربی (درجه دوم) بدست آمده (برای داده‌های واقعی) برای ویتامین ث به صورت زیر است:

$$Y_2(\text{mg}/100 \text{ g}) = +1.22 - 0.013 x_1 - 0.2161 x_2 + 0.00105 x_1 x_2 + 4 \times 10^{-5} x_1^2 + 0.011 x_2^2$$

کاهنده موجود در محیط قرار می‌گیرد (به عنوان سوبستراهای اصلی مؤثر در تشکیل HMF)، لذا میزان تشکیل ترکیبات HMF توسعه می‌یابد که حرارت اعمال شده حین فرآیند نیز بر این واکنش نقش تکمیلی دارد. بوردورلو و همکاران (۲۰۰۶) در مطالعه‌ای میزان ترکیبات HMF را در برخی از مرکبات مورد ارزیابی قرار دادند و مقدار آن را در لحظه تولید در محدوده ۰/۳۷ تا ۲/۶۴ mg/kg گزارش نمودند که نتایج پژوهش حاضر را تأیید می‌نماید. همچنین این محققین بیان داشتند که تشکیل HMF عمدتاً به دلیل تخریب اسید آسکوربیک (ویتامین ث) است و آنها همبستگی بسیار نزدیکی برای این دو ترکیب بدست آوردند (همبستگی بین ۰/۷۸ تا ۰/۹۶۷) (۲۳). مدل تجربی (درجه دوم) به دست آمده (برای داده‌های واقعی) برای ترکیبات HMF به صورت زیر است:

$$Y_3(\text{mg}/\text{kg}) = -1.99 + 0.062 x_1 + 0.026 x_2 - 0.018 x_1 x_2 + 7.14 \times 10^{-5} x_1^2 + 0.208 x_2^2$$

به منظور بررسی اثرات فرآیند بر ارزش تغذیه‌ای محصول نهایی، مقدار ویتامین ث به عنوان شاخصی از کیفیت تغذیه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. اثر همزمان دمای استخراج و نسبت اختلاط روی میزان ویتامین ث در شکل (۱) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در یک دمای استخراج ثابت (مثلاً ۷۰°C)، افزایش نسبت اختلاط از ۱:۱ تا ۳:۱ سبب کاهش میزان ویتامین ث گردید. احتمالاً این حالت به دلیل کاهش مقدار ویتامین ث استخراج شده از بافت کدو در واحد حجم عصاره است

شکل (۱) اثر همزمان دمای استخراج و نسبت اختلاط را روی میزان هیدروکسی متیل فورفورال (HMF) نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در یک دمای استخراج ثابت (مثلاً ۷۰°C)، افزایش نسبت اختلاط از ۱:۱ تا ۳:۱ سبب کاهش میزان HMF شد. احتمالاً این حالت به دلیل رقیق شدن عصاره استخراجی بوده که سبب کاهش میزان HMF در واحد حجم عصاره می‌گردد. همچنین نتایج نشان داد که در یک نسبت اختلاط ثابت (۲:۱)، افزایش دمای استخراج از ۵۵°C تا ۸۵°C سبب افزایش میزان HMF شد. ترکیب HMF می‌تواند در اثر واکنش مایلارد (حرارت دادن قندهای کاهنده در حضور ترکیبات پروتئینی) یا از طریق آبگیری تحت شرایط اسیدی ایجاد شود (۲۲). بنابراین در پژوهش حاضر هر چه دمای استخراج بیشتر شود، بدلیل اینکه مقدار بیشتری ترکیبات آمینواسیدی از بافت کدو استخراج شده و در مجاورت قندهای

کاهش میزان بتا-کاروتن شد. اساساً رنگ خاص کاروتن ناشی از سیستم پیوند دوگانه کتزوگه ترانس (ایزومر ترانس) است که در اثر حرارت این پیوند از حالت ترانس به سیس تبدیل شده که سبب کاهش شدت رنگ می‌گردد (۲۴). شی و همکاران (۲۰۰۲) بیان نمودند که فاکتورهای متعددی نظیر دمای بالا، نور، اکسیژن، اسیدها، کاتالیست و یون‌های فلزی می‌تواند روی میزان کاروتنوئیدهای مواد غذایی تأثیرگذار باشد (۲۵). مدل تجربی (درجه دوم) بدست آمده (برای داده‌های واقعی) برای رنگدانه بتا-کاروتن به صورت زیر است:

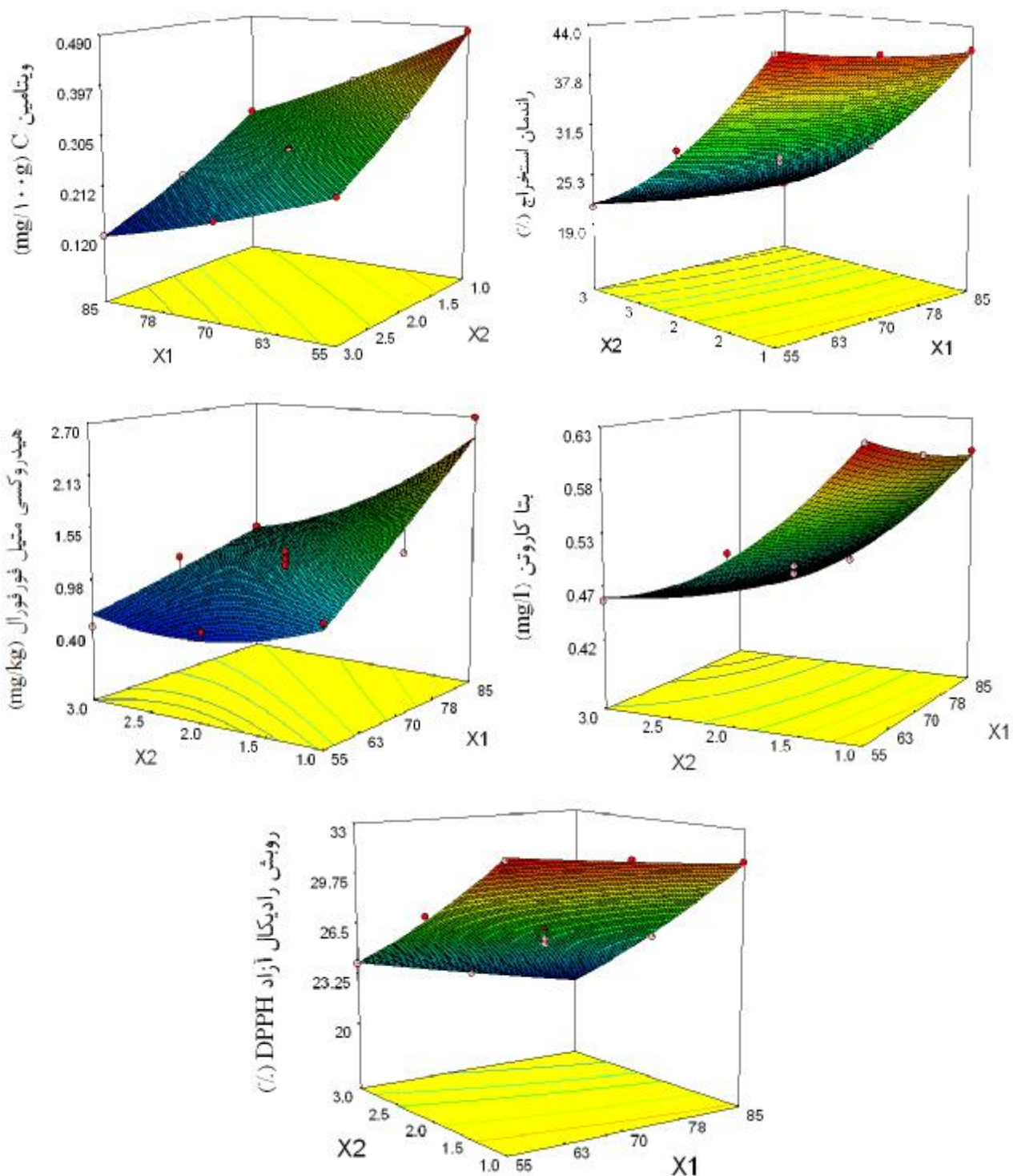
$$Y_4 (\text{mg/L}) = +1.009 - 4.92 \times 10^{-3} x_1 - 0.225 x_2 + 1.67 \times 10^{-5} x_1 x_2 + 2.62 \times 10^{-5} x_1^2 + 0.035 x_2^2$$

(نظیر بتا-کاروتن، لیکوپین و غیره) در اثر حرارت است. آدوم‌کان و همکاران (۲۰۱۵) در مورد خشک کردن پایا گزارش نمودند که افزایش دما سبب تخریب بیشتر رنگدانه‌های لیکوپین و بتا-کاروتن می‌شود (۲۴). جین و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی به بررسی خصوصیات آنتی‌اکسیدانی پلی‌ساکاریدهای کدوی حلوایی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که میزان رویش رادیکال آزاد DPPH در آنها حدوداً بین ۱۰٪ تا ۴۵٪ متغیر است که با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد (۲۶). مدل تجربی (درجه دوم) بدست آمده (برای داده‌های واقعی) برای رویش رادیکال آزاد DPPH به صورت زیر است:

$$Y_5 (\%) = +40.43 - 0.061 x_1 - 4.38 x_2 - 0.027 x_1 x_2 + 2.62 \times 10^{-4} x_1^2 + 0.419 x_2^2$$

نمودار سه بعدی اثر همزمان دمای استخراج و نسبت اختلاط روی میزان رنگدانه بتا-کاروتن در شکل (۱) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود در یک دمای استخراج ثابت (مثلاً ۷۰°C)، افزایش نسبت اختلاط از ۱:۱ تا ۳:۱ سبب کاهش میزان بتا-کاروتن شد. احتمالاً این حالت به دلیل رقیق شدن عصاره استخراجی بوده که سبب کاهش میزان بتا-کاروتن در واحد حجم عصاره می‌گردد. همچنین نتایج نشان داد که در یک نسبت اختلاط ثابت (۲:۱)، افزایش دمای استخراج از ۵۵°C تا ۸۵°C سبب

شکل (۱) اثر همزمان دمای استخراج و نسبت اختلاط را روی میزان رویش رادیکال آزاد DPPH نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در یک دمای استخراج ثابت (مثلاً ۷۰°C)، افزایش نسبت اختلاط از ۱:۱ تا ۳:۱ سبب کاهش میزان رویش رادیکال آزاد DPPH شد. احتمالاً این حالت به دلیل رقیق شدن عصاره استخراجی بوده که سبب کاهش میزان ترکیبات فنولیک در واحد حجم عصاره شده است. نتایج نشان داد که در یک نسبت اختلاط ثابت (۲:۱)، افزایش دمای استخراج از ۵۵°C تا ۸۵°C سبب کاهش میزان رویش رادیکال آزاد DPPH گردید. این حالت احتمالاً به دلیل تخریب ترکیبات آنتی‌اکسیدانی موجود در کدو



شکل ۱- تأثیر دمای استخراج (X_1) و نسبت اختلاط گوشته به حلال (X_2) روی خصوصیات فیزیکوشیمیایی کدوی تنبل طی فرآیند استحصال عصاره از بافت کدو تنبل

شد. رتوگرام یا نمودارهای تنش برشی - آهنگ برشی کنسانتره کدوی تنبل در دماهای ۳۵، ۴۵°C و غلظت‌های ۳۵، ۵۰ و ۶۵ درجه بریکس در شکل (۲) نمایش داده شده است. با توجه به رتوگرام‌های ارائه شده مشاهده می‌شود که تنش برشی کنسانتره کدوی تنبل با افزایش آهنگ برشی، با یک شیب ملایم افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده رفتار رقیق شونده با برش سیال ($n < 1$) است (۱۸). بدبودک و همکاران (۲۰۱۳) در پژوهشی رفتار رئولوژیکی کنسانتره انار را در دامنه دمایی ۱۰ تا ۷۰°C و غلظت‌های ۱۲ تا ۵۲ درجه بریکس بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که رفتار رئولوژیکی کنسانتره انار از قانون توان از نوع غلیظ شونده با برش (دایلاتانت) پیروی می‌نماید (۲۷). گراتاوا و همکاران (۲۰۰۷) رفتار رئولوژیکی عصاره Soursop را در دامنه دمایی ۰/۴ تا ۶۸/۸°C و غلظت‌های ۹/۳ تا ۴۹/۴ درجه بریکس بررسی نمودند و گزارش نمودند که سیال در pH پایین، رفتار غیرنیوتنی (رقیق شونده با برش) را از خود نشان می‌دهد (۲۸). دوتا و همکاران (۲۰۰۶) خصوصیات رئولوژیکی پوره کدوی حلوایی را در دامنه دمایی ۶۰ تا ۱۰۰°C و غلظت ۷/۲ درجه بریکس بررسی نمودند و گزارش نمودند که سیال، رفتار غیرنیوتنی (رقیق شونده با برش) را از خود نشان می‌دهد (۱۷). آلپ‌اسلان و هایتا (۲۰۰۲) خصوصیات رئولوژیکی پکمز (شیره انگور) مخلوط شده با ۲ تا ۶٪ خمیر کنجد را در دامنه دمایی ۳۰ تا ۷۵°C مطالعه نمودند و بیان داشتند که سیال، رفتار غیرنیوتنی (رقیق شونده با برش یا شبه پلاستیک) را از خود نشان می‌دهد (۲۹).

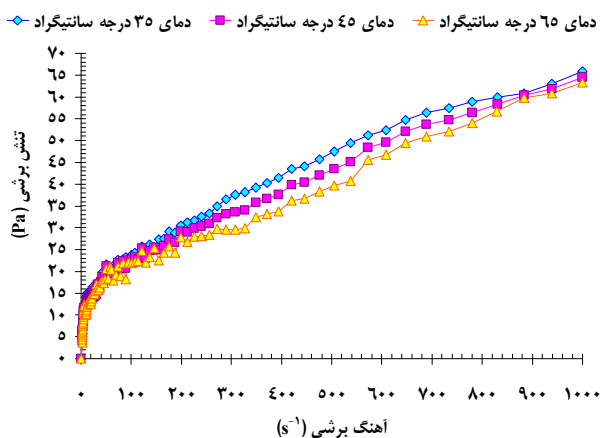
با توجه به آزمون‌ها و تحلیل‌های انجام شده در پایان بایستی نقاط بهینه در خصوص فرآیند استخراج عصاره کدوی تنبل تعیین گردد. نقطه بهینه نقطه‌ای است که در آن فرآیند تولید در شرایط ایده‌آل است. به منظور بهینه‌یابی فرآیند استخراج عصاره، ابتدا می‌بایست مهمترین اهداف مربوطه تعریف گردد. لذا هدف از بهینه‌یابی صورت گرفته در این مطالعه، رسیدن به مطلوب‌ترین حالت هم از دیدگاه اقتصادی و هم از دیدگاه فرآوری است. در فرآیند استخراج عصاره کدوی تنبل مهمترین شرط رسیدن به بیشینه بازده استخراج، ویتامین ث، بتا-کاروتن و روبش رادیکال آزاد DPPH و کمینه هیدروکسی متیل فورفورال است. با توجه به فرآیند بهینه‌یابی، نقاط بهینه برای متغیرهای مستقل دما استخراج و نسبت اختلاط به ترتیب ۵۵°C و ۱:۱ تعیین شد. همچنین مقادیر بهینه در مورد پاسخ‌های بازده استخراج، ویتامین ث، هیدروکسی متیل فورفورال، بتا-کاروتن و روبش رادیکال آزاد DPPH به ترتیب ۰/۴۳/۰۳، ۰/۴۷۷ (mg/۱۰۰g)، ۰/۸۵ (mg/kg)، ۰/۶۳ (mg/l) و ۳۲/۳۲٪ تعیین گردید.

۳-۲- رفتار جریان کنسانتره کدوی تنبل

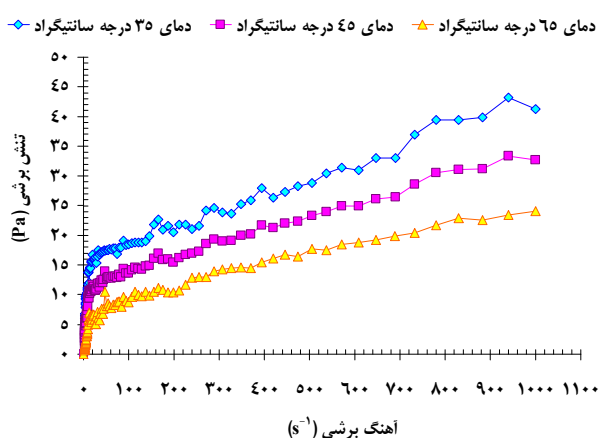
۳-۲-۱- تأثیر دما و غلظت روی منحنی تنش برشی - آهنگ

برشی

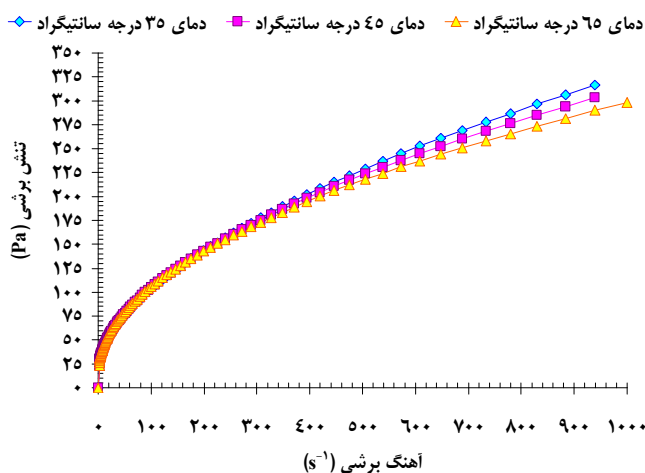
به منظور تعیین پارامترهای رئولوژیکی کنسانتره کدوی تنبل، ابتدا عصاره کدو در شرایط بهینه استخراج شد (یعنی دمای استخراج ۵۵°C و نسبت استخراج حدودا ۱:۱) و سپس توسط دستگاه تبخیرکننده چرخان در غلظت‌های یاد شده در بخش (۲-۳) تغلیظ



(الف)



(ب)



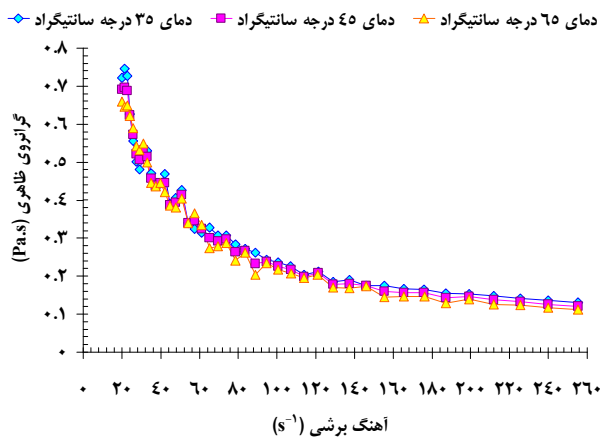
(ج)

شکل ۲- رئوگرام تنش برشی بر حسب آهنگ برشی برای کنسانتره کدوی تنبل در دماهای مختلف در ۳۵، ۴۵ و ۶۵°C برای غلظت‌های (الف) ۳۵ درجه بریکس، (ب) ۵۰ درجه بریکس و (ج) ۶۵ درجه بریکس.

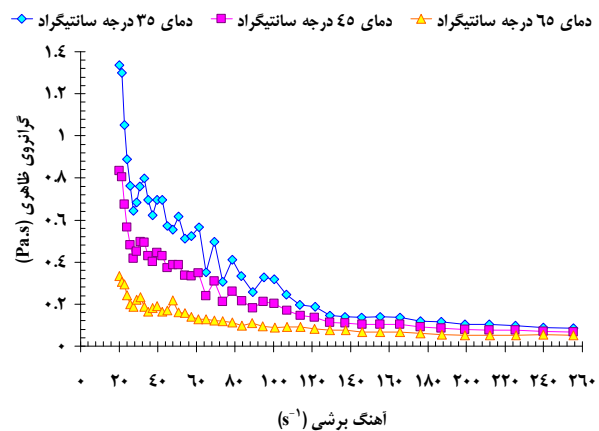
در سایر پژوهش‌ها مشاهده گردید (۱۷، ۲۸، ۲۹). گرانروی ظاهری کنسانتره کدوی تنبل در تمامی آهنگ‌های برشی مورد بررسی، با افزایش دما کاهش یافت که این حالت احتمالاً به دلیل تأخیر در برقرار نمودن نیروهای جذب درون مولکولی در دماهای بالاتر است (۱۸). کایا و بلی‌باقلی (۲۰۰۲) نتایج مشابه هنگام مطالعه گرانروی ظاهری پکمز ترکی در دماهای (۱۰ تا ۵۰°C) و غلظت‌های مختلف (۵۲/۱ تا ۷۲/۹ درجه بریکس) بدست آوردند (۳۰).

۳-۲-۲- تأثیر دما و غلظت روی گرانروی ظاهری

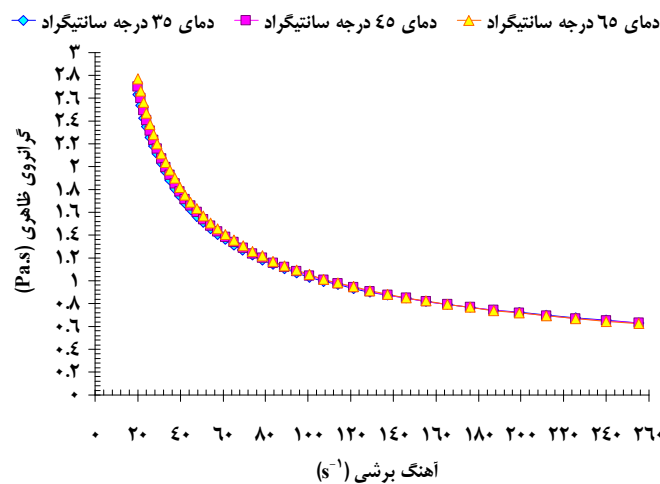
نتایج نشان داد که گرانروی ظاهری کنسانتره کدوی تنبل اندازه‌گیری شده به آهنگ برشی وابسته است (شکل ۳). هنگامیکه آهنگ برشی افزایش می‌یابد، گرانروی ظاهری کاهش می‌یابد که این کاهش در دمای بیشتر (۶۵°C) و غلظت پایین‌تر (۳۵ درجه بریکس) با نرخ سریع‌تری اتفاق می‌افتد، که این حالت رفتار شبه پلاستیک کنسانتره کدوی تنبل را تأیید می‌نماید (۱۸). نتایج مشابه



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳- تغییرات گرانیوی ظاهری کنسانتره کدوی تنبیل بر حسب تابعی از آهنگ برشی در دماهای مختلف (۳۵، ۴۵ و ۶۵°C) برای غلظت‌های (الف) ۳۵ درجه بریکس، (ب) ۵۰ درجه بریکس و (ج) ۶۵ درجه بریکس.

رقیق‌شونده با برش (قانون توان شبه پلاستیک) با مقدار شاخص رفتار جریان کوچکتر از یک ($n < 1$) را نشان داد (۵). معادلات ۲۱ تا ۲۴ برای محاسبه مهمترین پارامترهای آماری برازش (R^2)، $P(\%)$ ، χ^2 و RMSE مدل‌های مختلف، برای ارتباط بین تنش برشی و آهنگ برشی کنسانتره کدوی تنبیل در دماها و غلظت‌های مختلف استفاده شد (به جدول ۳ مراجعه شود). در میان شش مدل رئولوژیکی مورد مطالعه، مقادیر شاخص‌های آماری R^2 ، $P(\%)$ ، χ^2 و RMSE به ترتیب در دامنه $0.7975 \leq R^2 \leq 0.9996$ ، $0.338/0.5 \leq P(\%) \leq 417/8.9/533$ ، $0.1016 \leq \chi^2 \leq 0.126$ و $0.23 \leq RMSE \leq 126$

۳-۲-۳- مدلسازی رفتار جریان و برازش داده‌ها

مدل‌های رئولوژیکی مختلفی برای مدلسازی رفتار جریانی کنسانتره میوه‌ها و محصولات غذایی خمیری نظیر کنسانتره کدوی تنبیل پیشنهاد شده است. به عنوان مثال، مدل قانون توان برای کنسانتره آب sour-sop (۵) و آمیخته خمیر کنجد/پکمز (۳۱)، مدل هرشل بالکلی برای آب انار (۲۷) و مدل نیوتنی برای عصاره نیشکر (۳۲) پیشنهاد شده است. ویژگی‌های رئولوژیکی آب انار و ملاس یزدی از مدل هرشل بالکلی پیروی نمود و رفتار غلیظ‌شونده با برش ملایمی داشت (۲۷). کنسانتره آب sour-sop رفتار

تا $3/29 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ متغیر بودند. با توجه به اینکه مقدار شاخص رفتار جریان کوچکتر از یک است ($n < 1$)، بنابراین در دماها و غلظت‌های مورد مطالعه، کنسانتره کدوی تنبل رفتار جریانی رقیق شونده با برش (شبه پلاستیک) را نشان می‌دهد.

متغیر بود. براساس ارزیابی آماری و شایستگی کلی، مدل کاسون اصلاح شده به عنوان بهترین مدل جهت توصیف رفتار رئولوژیکی کنسانتره کدوی تنبل، به ویژه در غلظت‌های بالا، انتخاب شد (جدول ۳). نتایج نشان داد که مقادیر n و K_c برای مدل یاد شده (کاسون اصلاح شده) به ترتیب بین $0/058$ تا $0/261$ و $1/03 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ و $0/267$ تا $0/390$ قرار دارند.

جدول ۳- پارامترهای رئولوژیکی مدل‌های منتخب برای توصیف رفتار جریانی کنسانتره کدوی تنبل در غلظت‌ها و دماهای مختلف

دما (°C)/غلظت (درجه بریکس)									ثابت‌ها	مدل‌ها
65°C			45°C			35°C				
65	50	35	65	50	35	65	50	35		
آسوالد-دی-اِل										
0/998	0/958	0/9693	0/998	0/958	0/9693	0/9967	0/9833	0/9311	R^2	
273/9	232/4	82/5	136/9	116/2	41/25	395/5	175/42	190/65	$P(\%)$	
3/27	2/84	1/04	1/635	1/423	0/521	4/53	2/01	2/32	RMSE	
10/92	8/27	1/11	2/73	2/068	0/277	21/001	4/123	5/51	χ^2	
15/12	3/85	1/60	10/17	2/51	1/04	12/47	4/17	5/79	K	
0/428	0/385	0/384	0/428	0/385	0/384	0/467	0/390	0/267	n	
بینگهام										
0/9221	0/9394	0/8673	0/9221	0/9394	0/8673	0/9416	0/9301	0/8394	R^2	
1753/1	264/64	184/5	876/6	132/32	92/27	1640/8	338/05	284/73	$P(\%)$	
20/23	3/42	2/16	10/11	1/710	1/082	19/006	4/112	3/54	RMSE	
417/8	11/93	4/78	104/4	2/98	1/196	368/7	17/25	12/83	χ^2	
53/66	12/21	4/96	26/83	6/103	2/48	50/22	13/46	12/49	τ_0	
0/306	0/055	0/022	0/306	0/055	0/022	0/335	0/062	0/033	K	
کاسون پلاستیک										
0/9549	0/922	0/8556	0/9549	0/922	0/8556	0/9671	0/9379	0/7975	R^2	
49/02	25/33	31/45	34/66	17/91	22/24	42/72	21/91	33/36	$P(\%)$	
0/743	0/404	0/401	0/525	0/286	0/284	0/6732	0/387	0/496	RMSE	
0/563	0/167	0/164	0/281	0/083	0/082	0/462	0/153	0/251	χ^2	
5/35	2/73	1/59	3/78	1/93	1/13	5/05	2/82	2/92	$\tau_0'^{10}$	
0/426	0/168	0/118	0/426	0/168	0/118	0/455	0/182	0/119	K_c	
هرشل بالکلی										
0/9996	0/9737	0/9694	0/9996	0/9737	0/9694	0/9996	0/9911	0/9319	R^2	
66/28	184/78	82/51	33/14	92/39	41/25	79/59	112/58	191/36	$P(\%)$	
1/419	2/25	1/04	0/709	1/127	0/52	1/65	1/47	2/31	RMSE	
2/077	5/239	1/116	0/519	1/309	0/279	2/83	2/23	5/50	χ^2	
11/77	7/23	-0/311	5/886	3/615	-0/155	14/69	5/769	2/19	τ_0	
10/25	0/898	1/76	7/16	0/675	1/14	7/37	1/68	4/26	K	
0/481	0/588	0/371	0/481	0/588	0/371	0/541	0/515	0/305	n	

جدول ۴- پارامترهای رئولوژیکی مدل‌های منتخب برای توصیف رفتار جریان کنسانتره کدوی تنبل در غلظت‌ها و دماهای مختلف (ادامه)

دما (°C)/غلظت (درجه بریکس)									ثابت‌ها	مدل‌ها
۶۵°C			۴۵°C			۳۵°C				
۶۵	۵۰	۳۵	۶۵	۵۰	۳۵	۶۵	۵۰	۳۵		
کاسون اصلاح شده										
۰/۹۹۹۶	۰/۹۸۵۶	۰/۹۷۱۲	۰/۹۹۹۶	۰/۹۸۵۶	۰/۹۷۱۲	۰/۹۹۹۶	۰/۹۹۴۵	۰/۹۴۷۹	R ^۲	
۱۳/۴۸	۲۲/۷۱	۱۸/۰۸	۹/۵۳۳	۱۶/۰۶	۱۲/۷۹	۱۵/۸۱	۱۸/۰۸	۲۳/۵۸	P(Δ)	
۰/۱۷۹	۰/۲۸۶	۰/۲۳۹	۰/۱۲۶	۰/۲۰۲	۰/۱۶۹	۰/۲۲۴	۰/۲۱۰	۰/۲۹۰	RMSE	
۰/۰۳۳	۰/۰۸۴	۰/۰۵۹	۰/۰۱۶	۰/۰۴۲	۰/۰۲۹	۰/۰۵۱	۰/۰۴۵	۰/۰۸۷	χ ^۲	
۰/۹۵۵	۰/۲۰۷	-۰/۳۸۷	۰/۶۷۵	۰/۱۴۷	-۰/۲۷۴	۱/۴۵۳	۰/۵۴۲	-۵/۳۳	τ ₀	
۳/۲۹	۱/۹۴	۱/۵۳	۲/۷۳	۱/۷۳	۱/۲۲	۲/۶۷	۱/۵۶	۱/۰۳	K' _c	
۰/۲۲۸	۰/۱۸۶	۰/۱۷۵	۰/۲۲۹	۰/۱۸۶	۰/۱۷۵	۰/۲۶۱	۰/۲۰۶	۰/۰۵۸	n	
سیسکو										
۰/۹۹۷۴	۰/۹۶۰۹	۰/۹۴۸۸	۰/۹۹۷۴	۰/۹۶۰۹	۰/۹۴۸۸	۰/۹۹۶۴	۰/۹۸۱۷	۰/۹۳۰۵	R ^۲	
۱۱۸/۷	۱۳۷/۹	۷۸/۰۱	۵۹/۳۴	۶۸/۹۵	۳۹/۰۱	۱۲۶/۳	۸۸/۹۹	۱۶۷/۴۲	P(Δ)	
۱/۴۷	۱/۶۶۹	۱/۰۰۹	۰/۷۳۵	۰/۸۳۴	۰/۵۰۴	۱/۵۰۴	۱/۱۵۳	۲/۰۱۹	RMSE	
۲/۲۳۲	۲/۸۷۴	۱/۰۵	۰/۵۵۸	۰/۷۱۸	۰/۲۶۲	۲/۳۳۵	۱/۳۷۱	۴/۲۰	χ ^۲	
۰/۰۷۱	۰/۰۳۴	۰/۰۰۴۷	۰/۰۷۱	۰/۰۳۴	۰/۰۰۴۷	۰/۱۱۳	۰/۰۲۸	۰/۰۱۳	A	
۱۸/۲۵	۶/۷۲	۱/۸۶	۱۱/۷۸	۳/۸۷	۱/۱۷	۱۶/۹۶	۶/۱۹	۷/۲۱	B	
۰/۳۶۷	۰/۲۰۷	۰/۳۳۵	۰/۳۶۷	۰/۲۰۷	۰/۳۳۵	۰/۳۷۰	۰/۲۶۵	۰/۱۹۱	n	

همکاران (۲۰۱۳) هنگامیکه انرژی فعالسازی و ضریب تبیین را برای کنسانتره آب sour-sop محاسبه نمودند، به یافته‌های مشابه‌ای دست یافتند (۵). همچنین نتایج بدست آمده در مورد انرژی فعالسازی نشان داد که گرانروی ظاهری به تغییرات دمایی اتفاق افتاده طی فرآیند گرمایش کنسانتره کدوی تنبل حساس است. کوک و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که ضریب قوام (K) کنسانتره آب sour-sop وابستگی بالایی با دما و غلظت داشت (۵).

۳-۲-۴- تأثیر دما روی پارامترهای رئولوژیکی

رابطه آرنیوس برای توصیف تأثیر دما روی گرانروی ظاهری کنسانتره کدوی تنبل استفاده گردید. مقادیر محاسبه شده انرژی فعالسازی، ضریب پیش‌نمایی آرنیوس (η₀) و ضریب تبیین (R^۲) کنسانتره کدوی تنبل در جدول (۴) ارائه شده است. هر سه سطح غلظت کنسانتره کدوی تنبل برازش مناسبی در رابطه آرنیوس داشت (R^۲ > ۰/۹۷۲۶) و کمترین دقت برازش مربوط به غلظت ۶۵ درجه بریکس کنسانتره کدوی تنبل بود (R^۲ = ۰/۹۷۲۶). کوک و

جدول ۴- پارامترهای رابطه آرنیوس برای توصیف وابستگی دما روی گرانروی ظاهری کنسانتره کدوی تنبل (γ̇ = ۱۶۵ s⁻¹)

R ^۲	(kJ/mol) E _a	(Pa.s) η ₀	غلظت کنسانتره (°Brix)
۰/۹۹۵۶	۲۰/۳۴	۴/۷۸×۱۰ ^{-۳}	۳۵
۰/۹۷۸۲	۳/۶۲۶	۰/۰۴۰۲	۵۰
۰/۹۷۲۶	۰/۰۷۶	۰/۷۷۱	۶۵

۳-۲-۵- تأثیر غلظت روی پارامترهای رئولوژیکی

جهت بررسی تأثیر غلظت روی گرانروی ظاهری کنسانتره کدوی تنبل از دو مدل نمایی و توانی استفاده شد. جدول (۵) مقادیر ثابت‌های روابط نمایی و توانی را به همراه ضریب تبیین (R^2) در سه سطح دمایی نشان می‌دهد. در حالیکه مقادیر η_1 و η_2 با افزایش دما کاهش یافتند، مقادیر B_1 و B_2 ، افزایش نسبی را از خود نشان دادند. اگرچه هر دو رابطه توانی و نمایی برازش خوبی را بین گرانروی ظاهری و غلظت کنسانتره کدوی تنبل با مقادیر ثابت‌های به دست آمده نشان دادند، با این حال، مشاهده جزئی نشان داد که

رابطه نمایی مقادیر R^2 بالاتری ($R^2=0/8318$) نسبت به رابطه نمایی داشت ($R^2=0/7614$). پژوهشگران یافته‌های مشابهی را برای کنسانتره آب انار (۲۷)، پکمز قاضی آنتپ (۳۰) و کنسانتره آب آلبالو (۳۳) ارائه دادند. این نتایج نشان داد که رابطه نمایی برازش بهتری نسبت به رابطه توانی در توصیف گرانروی ظاهری عصاره‌های غذایی با توجه به غلظت‌های آنها دارد. به علاوه، رابطه نمایی برای کنسانتره عصاره میوه‌ها مناسب است درحالیکه رابطه توانی معمولاً برای پوره مواد غذایی بکار می‌رود (۳۴).

جدول ۵- پارامترهای روابط نمایی و توانی برای توصیف وابستگی غلظت روی گرانروی ظاهری کنسانتره کدوی تنبل ($\dot{\gamma}=165 \text{ s}^{-1}$)

R^2	$\eta = \eta_2 C^{B_2}$		$\eta = \eta_1 \exp(B_1 C)$			دم (°C)
	B_2	η_2	R^2	B_1	η_1	
۰/۷۶۱۴	۲/۷۰۴۶	$7/3 \times 10^{-7}$	۰/۸۳۱۸	۰/۰۵۸۶	۰/۰۱۴۰۸	۳۵
۰/۸۳۸۹	۳/۱۸۸	$9/9 \times 10^{-7}$	۰/۸۹۷۹	۰/۰۶۸۳	۰/۰۰۷۶۷	۴۵
۰/۹۱۴	۳/۸۸۰۶	$5/7 \times 10^{-8}$	۰/۹۵۶۶	۰/۰۸۲۲	۰/۰۰۳۲۵	۶۵

۳-۲-۶- تأثیر غلظت روی انرژی فعالسازی

تغییرات انرژی فعالسازی با غلظت می‌تواند توسط روابط نمایی و توانی توصیف شود. ثابت‌های A_1 و b_1 رابطه نمایی (معادله ۱۳) و A_2 و b_2 رابطه توانی (معادله ۱۴) به همراه ضرایب R^2 مربوط به هر یک در جدول (۶) ارائه شده است. نتایج نشان داد که وابستگی

انرژی فعالسازی (E_a) به غلظت کنسانتره کدوی تنبل، توسط مدل نمایی ($R^2=0/9534$) نسبت به مدل توانی ($R^2=0/9096$) بهتر توصیف گردید. این یافته‌ها با نتایج اخیر گزارش شده برای کپمز قاضی آنتپ و آمیخته ارده و پکمز، همخوانی بالایی دارد (۲۹، ۳۰).

جدول ۶- پارامترهای روابط نمایی و توانی برای توصیف وابستگی غلظت روی انرژی فعالسازی کنسانتره کدوی تنبل ($\dot{\gamma}=165 \text{ s}^{-1}$)

R^2	$E_a = A_2 C^{b_2}$			$E_a = A_1 \exp(b_1 C)$		
	b_2	A_2	R^2	b_1	A_1	
۰/۹۰۹۶	-۸/۷۸۵۹	$1/1 \times 10^{10}$	۰/۹۵۳۴	-۰/۱۸۶۳	۱۹۷۴۳/۹	

۴- سپاسگزاری

مقاله علمی- پژوهشی حاضر مستخرج از طرح پژوهشی با کد ۱۱۳۹۶۰۶۲۰۰۰۳ مصوب دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن می‌باشد. نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند که از معاونت پژوهش فناوری دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن به دلیل

مساعدهت‌های مالی جهت اجرای این طرح پژوهشی صمیمانه تشکر و قدردانی نمایند.

۵- نتیجه‌گیری

به طور کلی با توجه به پژوهش حاضر نتایج زیر بدست آمد:

5. 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: 380-386.

6. Magerramov, M.A., Abdulagatov, A.I., Azizov, N.D., Abdulagatov, I.M. 2007. Effect of temperature, concentration, and pressure on the viscosity of pomegranate and pear juice concentrates. *J. Food Eng.*, 80: 476-489.

7. AOAC. 1990. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists, 17th ed., AOAC Press, Arlington, TX.

8. Zamani, H., Maskooki, A.M., Tavkoolypure, H., Pakizeh, M. 2010. Studying chemo-physical properties of concentrated raisin and condensing its syrup using the mal method in lab scale. *J. Food Sci. Technol.*, 7: 87-98. (In Persian)

9. Chin, N.L., Chan, S.M., Yusof, Y.A., Chuah, T.G., Talib, R.A. 2009. Modelling of rheological behaviour of pummelo juice concentrates using master-curve. *J. Food Eng.*, 93: 134-140.

10. ISIRI 2001. Fruits, vegetables and derived products determination of ascorbic acid (Vitamin C)-(Routine method). No. 5609. (In Persian)

11. ISIRI 2007. Fruit juices-Test methods. No. 2685, 1-38. (In Persian)

12. ISIRI 2004. Food additives: β -Caroten food grade cws 10 %-Specification and test methods. No. 8024, 1-32. (In Persian)

13. Wimalasiri, D., Brkljača, R., Piva, T.J., Urban, S., Huynh, T. 2017. Comparative analysis of carotenoid content in *Momordica cochinchinensis* (Cucurbitaceae) collected from Australia, Thailand and Vietnam. *J. Food Sci. Technol.*, DOI 10.1007/s13197-017-2719-0.

14. Sathiya Mala, K., Kurian, A.E. 2016. Nutritional composition and antioxidant activity of pumpkin wastes. *Int. J. Pharm. Chem. Bio. Sci.*, 6(3): 336-344.

15. Burits, M., Bucar, F. 2000. Antioxidant activity of nigella sativa essential oil. *J. Phytotherapy Res.*, 14: 323-28.

16. Tiziani, S., Vodovotzm, Y. 2005. Rheological effects of soy protein addition to tomato juice. *Food Hydrocolloids*, 19: 45-52.

7. Dutta, D., Dutta, A., Raychaudhuri, U., Chakraborty, R. 2006. Rheological characteristics and thermal degradation kinetics of beta-carotene in pumpkin puree. *J. Food Eng.*, 76: 538-546.

- با در نظر گرفتن یافته‌های پژوهش می‌توان بیان نمود که به ترتیب در دامنه غلظت و دمای ۳۵ تا ۶۵ درجه بریکس و ۳۵ تا ۶۵°C، کنسانتره کدوی تنبل به عنوان یک سیال غیرنیوتنی از نوع رقیق شونده با برش ($n < 1$) است.

- هر دو فاکتور شاخص رفتار جریان (n) و گرانیوی ظاهری (η) به طور معنی‌داری تحت تأثیر دما (T) قرار گرفتند. تغییرات n با T از یک روند قابل توصیفی پیروی نمی‌کند درحالی‌که ارتباط η و T می‌تواند توسط رابطه آرنیوس به طور موفقیت‌آمیزی توصیف گردد.

- در میان شش مدل آزموده شده مختلف، مدل کاسون اصلاح شده به عنوان بهترین مدل برای توصیف رابطه بین تنش برشی و آهنگ برشی کنسانتره کدوی تنبل با ضریب تبیین ($R^2 > 0.9479$) انتخاب شد.

- هر دو معادله توانی و نمایی به طور کافی توانست تأثیر غلظت را روی گرانیوی ظاهری کنسانتره کدوی تنبل بیان نماید، با این حال، معادله نمایی برازش بهتری داشت و مقدار کفایت برازش بهتری را به همراه داشت ($R^2 > 0.8318$).

۵- منابع

1. FAO. 2014. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, FaoStat Database, Available from <http://faostat.fao.org>.

Makroo, H.A., Prabhakar, P.K., Rastogi, N.K., Srivastava, B. 2018. Characterization of mango puree based on total soluble solids and acid content: effect on physico-chemical, rheological, thermal and ohmic heating behaviour. *LWT-Food Sci. Technol.*, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.01.003>.

3. Martınez-Padilla, L.P., Franke, L., Juliano, P. 2017. Characterisation of the viscoelastic properties of avocado puree for process design applications. *J. Biosys. Eng.*, 161: 62-69.

4. Sharma, M., Kristo, E., Corredig, M., Duizer, L. 2017. Effect of hydrocolloid type on texture of pureed carrots: Rheological and sensory measures. *Food Hydrocolloids*, 6: 478-487.

- polysaccharides. *J. Innov. Food Sci. Emer. Technol.*, 35:103-110.
27. Bodbodak, S., Kashaninejad, M., Hesari, J., Razavi, S.M.A. 2013. Modeling of rheological characteristics of "Malas Yazdi" (*Punica granatum* L.) pomegranate Juice. *J. Agric. Sci. Technol.*, 15: 961-971.
28. Gratão, A.C.A., Silveira, Jr., V., Telis-Romero, J. 2007. Laminar flow of soursop juice through concentric annuli: friction factors and rheology. *J. Food Eng.*, 78: 1343-1354.
29. Alpaslan, M., Hayta, M. 2002. Rheological and sensory properties of pekmez (grape molasses)/tahin (sesame paste) blends. *J. Food Eng.*, 54: 89-93.
30. Kaya, A., Belibağlı, K.B. 2002. Rheology of solid Gaziantep Pekmez. *J. Food Eng.*, 54: 221-226.
31. Arslan, E., Yener, M.E., Esin, A. 2005. Rheological characterization of tahin/pekmez (sesame paste/concentrated grape juice) blends. *J. of Food Eng.*, 69: 167-172.
32. Astolfi-Filho, Z., Telis, V.R.N., Oliveira, E.B.D., Coimbra, J.S.D.R., Telis-Romero, J. 2011. Rheology and fluid dynamics properties of sugarcane juice. *Biochem. Eng. J.*, 53: 260-265.
33. Juszczak, L., Fortuna, T. 2004. Effect of temperature and soluble solids content on the viscosity of cherry juice concentrate. *Int. Agrophys.*, 18: 17-21.
34. Ibarz, A., Marco, F., Pagan, J. 1993. Rheology of persimmon juices. *Fruit Proc.*, 3: 182-187.
18. Steffe, J. 1996. Rheological Methods in Food Process Engineering. Freeman Press, New York, USA.
19. Tavakolipour, H., Mokhtarian, M. 2012. Neural network approaches for prediction of pistachio drying kinetics. *Int. J. Food Eng.*, 8, Article 42.
20. Mota, C.L., Luciano, C., Dias, A., Barroca, M.I., Guine, R.P.F. 2010. Convective drying of onion: kinetics and nutritional evaluation. *J. Food and Bioprodu. Proc.*, 88: 115-123.
21. Fennema, O.R. 1996. *Food Chemistry*, Marcel Dekker, Inc., New York, NY.
22. Ajlouni, S., Sujirapinyokul, P. 2009. Hydroxymethylfurfural dehyde and amylase contents in Australian honey. *J. Food Chem.*, 119: 1000-1005.
23. Urdurlu, H.S., Karadeniz, F. 2003. Effect of storage on nonenzymatic browning of apple juice concentrates. *J. Food Chem.*, 80: 91-97.
24. Udomkun, P., Nagle, M., Mahayothee, B., Nohr, D., Koza, A., Müller, J. 2015. Influence of air drying properties on non-enzymatic browning, major bio-active compounds and antioxidant capacity of osmotically pretreated papaya. *J. LWT-Food Sci. Technol.*, 60: 914-922.
25. Shi, J., Le Maguer, M., Bryan, M. 2002. *Lycopene from tomatoes*, In J. Shi, G. Mazza, & M. Le Maguer (Eds.), *Functional foods-biochemical and processing aspects* (pp. 135-168), USA, CRC Press.
26. Jin, Y., Yang, N., Tong, Q., Jin, Z., Xu, X. 2016. Rotary magnetic field combined with pipe fluid technique for efficient extraction of pumpkin

(Original Research Paper)

Determination and Modeling of Rheological Properties of Pumpkin Concentrate (*Cucurbita maxima*)

Mohsen Mokhtarian^{1*}, Marjan Nouri²

1-Department of Food Science and Technology, Roudhen Branch, Islamic Azad University, Roudhen, Iran.

Received:09/05/2019

Accepted:12/10/2019

Abstract

A rotational viscometer used to evaluate rheological parameters of pumpkin concentrate with concentrations of 35, 50, and 65°Brix at respectively 35, 45, and 65°C. Then various mathematical models including Ostwald-de-Waele (power-law fluid), Bingham, Casson plastic, Herschel-Bulkley, Modified Casson and Sisko, which applied to define the flow characteristics of pumpkin concentrate. The results showed that the pumpkin concentrate behaves as non-Newtonian, shear thinning fluid ($n < 1$) in concentration and temperature ranges of 35-65°Brix and 35-65°C, respectively. The relationship between shear stress and shear rate of pumpkin concentrate showed that only Modified Casson models could describe the rheological parameters of pumpkin concentrate. Mathematical calculations showed that the consistency coefficient and fluid behavior index parameters of pumpkin concentrate were temperature dependence and time-independent, respectively. The Arrhenius equation showed that the activation energy (E_a) of pumpkin concentrate depends on two important parameters of brix concentration and apparent viscosity and changed from 0.076 to 20.34 (kJ/mol). The power-type and exponential-type equations adequately described the effect of concentration on the apparent viscosity of pumpkin concentrate. However, the exponential-type equation had a better fit for describing of noted behaviour.

Keywords: Pumpkin, Activation Energy, Non-Newtonian Fluids, Concentrate, Rheological Modeling.

*Corresponding Author: mokhtarian.mo@riau.ac.ir