



تعیین همبستگی میان قوام‌سنج بوستویک و ویسکومتر دورانی

در ارزیابی ویسکوزیته ی رب گوجه‌فرنگی

آرزو تاج نیا^{۱*}، حمید توکلی‌پور^۲، امیرحسین الهامی راد^۲

^۱ دانش آموخته ی کارشناسی ارشد مهندسی علوم و صنایع غذایی دانشگاه آزاد اسلامی واحد سبزوار (مسئول مکاتبات)

پست الکترونیک : tajnia.arezoo@yahoo.com

آستادیار گروه علوم و صنایع غذایی دانشگاه آزاد اسلامی واحد سبزوار

تاریخ دریافت: ۸۷/۱۰/۱۵ تاریخ پذیرش: ۸۷/۱۰/۱۷

چکیده

از آن جا که ویسکوزیته عامل مهمی در تعیین کیفیت رب گوجه فرنگی می‌باشد ، برای بسیاری از مصرف کنندگان ، میزان ویسکوزیته عامل مهمی در خرید آن می‌باشد. به طوری که بعضی از خریداران عمده ی خارجی ، رب را با ویسکوزیته ی مشخص خریداری می‌کنند. همچنین ویسکوزیته ی ظاهری در پذیرش محصولات غذایی یک ویژگی مهم برای مصرف کننده محسوب می‌شود. با توجه به این که استاندارد مناسبی از قوام و ویسکوزیته ی رب گوجه فرنگی در دسترس نیست و کارخانجات تولید رب گوجه فرنگی قوام رب را بر اساس آزمون بوستویک تعریف می‌کنند ، در این پژوهش به تعیین همبستگی بین قوام‌سنج بوستویک و ویسکومتر دورانی در سه بریکس ۱۲، ۱۶ و ۲۰ و سه دمای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ °C در چهار فاصله ی زمانی ۵ ، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ ثانیه بوستویک پرداخته شده است . در نهایت همبستگی میان دو دستگاه ویسکومتر دورانی و قوام‌سنج بوستویک به دست آمد که با کمک معادلات حاصل می‌توان ویسکوزیته ی دقیق رب گوجه فرنگی را تعیین کرد. در نهایت نتایج نشان داد که بیش ترین همبستگی بین دو دستگاه در زمان ۳۰ ثانیه می‌باشد.

واژه های کلیدی : رب گوجه فرنگی ، پارامترهای رئولوژیکی ، قوام‌سنج بوستویک ، ویسکومتر دورانی

۱- مقدمه

بهبود خصوصیات رئولوژیکی رب گوجه فرنگی نه تنها یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های پذیرش این محصول توسط مصرف کننده می‌باشد، بلکه از شاخص‌های مهم درجه‌بندی و استاندارد محصول بوده و به لحاظ اقتصادی نیز اهمیت ویژه‌ای دارد. بهبود ویسکوزیته ی ظاهری ، مقدار گوجه فرنگی مورد نیاز را جهت رسیدن به سطح مشخصی از کیفیت کاهش می‌دهد و در نتیجه باعث کاهش هزینه‌ها می‌شود. به محصول حاصل از تغلیظ پالپ گوجه فرنگی پس از جدا کردن پوست و دانه، رب گوجه فرنگی گفته می‌شود (۳). تولید رب گوجه فرنگی به دو صورت انجام می‌گیرد: روش خرد کردن گرم یا تولید رب گوجه فرنگی با قوام بالا (هات بریک) و روش خرد کردن سرد یا تولید رب گوجه فرنگی با قوام متوسط (کلدبریک). عوامل متعددی بر کیفیت محصولات نهایی گوجه فرنگی فرآوری شده موثرند که باید توافقی مابین عوامل مختلف جهت به دست آوردن فرآورده ای با خواص کیفی قابل قبول ایجاد نمود (۲). برای کنترل کیفیت رب تولیدی راه ساده ، محاسبه ی جامدات محلول طبیعی (NTSS) یا بریکس در سرم است که شاخصی برای قوام (Consistency) است. راه مناسب تر استفاده از قوام‌سنج بوستویک و عدد قوام به عنوان شاخصی از ویسکوزیته است که این روش در کارخانجات تولید رب گوجه فرنگی معمول می‌باشد ، اما روش دقیق ، استفاده از انواع ویسکومتر و رئومترها است که کاربرد این



ابزارها، گران می باشد. قوام سنج بوستویک کمیتی به نام عدد قوام می دهد، این کمیت به گونه ای است که مجموعه ی خواص رئولوژیکی را که مسوول رفتار ویسکوز غیرنیوتنی محصول می باشد، تحت پارامتر واحدی گرد می آورد ، به این تکنیک خیلی ساده کانسیستنسی بوستویک یا آزمون بوستویک می گویند (۳ و ۲). مک کارتی و سیمور در سال ۱۹۹۴ رابطه ی زیر را برای اندازه گیری سرعت برشی اعمال شده در قوام سنج بوستویک ارائه کردند (۶):

$$\dot{\gamma} = \frac{L^2}{qt} \quad ۱$$

مطالعه تغییر شکل یا جریان یک ماده تحت تأثیر نیروهای اعمال شده را رئولوژی گویند . مدل های تجربی زیادی برای ارتباط تنش برشی در سیالات ارائه شده است . چند مدل مختلف که بیش تر در صنایع غذایی معمول هستند عبارتند از:

| | |
|---|---------------------|
| $\sigma = \sigma_0^{0.5} + k\dot{\gamma}^{0.5}$ | مدل بینگهام پلاستیک |
| $\sigma = \sigma_0 + \mu_{pl}\dot{\gamma}$ | مدل کاسون |
| $\sigma = \sigma_0 + k\dot{\gamma}^n$ | مدل هرشل - بالکلی |
| $\sigma = k\dot{\gamma}^n$ | مدل قانون توان |

n شاخص رفتار جریان، شیب منحنی لگاریتمی بوده و با افزایش میزان شبه پلاستیک بودن از یک به سمت صفر تغییر می کند. k ضریب پایداری ، عرض از مبدأ منحنی می باشد که عموماً نسبت به شاخص رفتار جریان در مقابل دما حساس تر است (۹). تولدو در سال ۱۹۸۰ نشان داد که عصاره ی گوجه فرنگی از مدل قانون توان پیروی کرده و با افزایش بریکس در دمای ثابت ، ضرایب پایداری افزایش یافته ، ولی شاخص رفتار جریان تغییرات منظمی را دنبال نمی کند (۵). فیتو و همکاران در سال ۱۹۸۳ رب گوجه فرنگی را با مدل رقیق شونده با برش برازش کردند و برای رب هات بریک و کلد بریک پارامترهای رئولوژیکی (ضریب پایداری K و شاخص رفتار جریان n) را محاسبه کردند و دریافتند که تغییرات شاخص جریان (n) با دما معنی دار نمی باشد ، ولی تغییرات ضریب پایداری (K) وابسته به دما است و همچنین ضریب پایداری با غلظت نیز رابطه داشت (۴) .

کاترین و مایکل مک کارتی در سال ۲۰۰۴ همبستگی بین ویسکومتر دورانی از نوع باب و کاپ (قطر باب ۲۵ mm و قطر کاپ ۲۷/۵ mm) و قوام سنج بوستویک را در ۳۰ ثانیه با کمک آب گوجه فرنگی حاصل از ۱۸ اوریته ی مختلف در دمای ۲۰ °C به دست آوردند. به این ترتیب که از ویسکومتر دورانی با تنظیم سرعت برشی در فاصله ۰ تا ۵۰ s⁻¹ و رسم نمودار تنش برشی بر حسب سرعت برشی با فرض این که سیال از مدل قانون توان پیروی می کند مقادیر ضریب پایداری و شاخص رفتار جریان را به دست آورده ، سپس سرعت برشی را توسط رابطه ی (۱) به وسیله طول های بوستویک در زمان ۳۰ ثانیه به دست آوردند و با قرار دادن مقادیر شاخص جریان و ضریب پایداری به همراه سرعت برشی بدست آمده در رابطه ی (۲) مقادیر η را محاسبه و همچنین دانسیته را نیز در بریکس و دمای مورد نظر محاسبه کرده و با رسم

نمودار L بر حسب $\left(\frac{\eta}{\rho}\right)^{-0.2}$ ، همبستگی بین طول بوستویک (L) و $\left(\frac{\eta}{\rho}\right)^{-0.2}$ را با $R^2 = 0.8977$ پیدا کردند (۵).

$$\eta = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad ۲ \text{ رابطه بین ویسکوزیته ی ظاهری و سرعت برشی در سیالات قانون توان (۹) :}$$

این محققان با استفاده از اثر نیروی جاذبه و شتاب ثقل بر روی جریان اظهار کردند که شاید بتوان با اندازه گیری مسافت طی شده در بوستویک ، ویسکوزیته ی ظاهری برای مایعات همگن و سوسپانسیون ها را پیش بینی کرد (۷). پائولو



پرونا (۲۰۰۵) برای تعیین همبستگی بین درجه بوستویک و پارامترهای رئولوژیکی در پوره میوه جات از چهار فاصله زمانی ۱۵، ۳۰، ۶۰ ثانیه استفاده کرد (۸). در این روش ابتدا بهترین مدل برای سیال رب گوجه فرنگی و سپس همبستگی بین دو دستگاه تعیین گردید.

۲- مواد و روش‌ها

رب گوجه فرنگی مورد نیاز (فاقد نمک) از کارخانه چین چین بین‌الملل با بسته‌بندی اسپتیک در ۹ بسته ۱/۵ کیلوگرمی تهیه گردید. نمونه مورد نظر، از رب تولیدی یک بچ کارخانه در یک شیفت کاری به‌طور یکنواخت انتخاب گردید و به آزمایشگاه منتقل شد. نمونه‌ها عاری از هرگونه مواد افزودنی مجاز و نمک در ظروف سر بسته درون یخچال نگهداری شدند. بریکس‌های ۱۲ و ۱۶ و ۲۰ از رب توسط رقیق‌سازی رب اولیه با آب مقطر ساخته شد. یکنواخت کردن نمونه به وسیله ی میکسر (ساخت شرکت IKA آلمان با زبانه صفحه‌ای) به مدت ۱۵ دقیقه و بریکس گیری مداوم از نمونه ی توسط رفراکتومتر انجام گردید. دماهای مورد بررسی ۲۵، ۳۵ و ۴۵ °C بود. آزمایش ها در سه تکرار انجام پذیرفت. در ویسکومتر دورانی آنتون پار (مدل DV3 - p ساخت کشور آلمان) پس از انتخاب محدوده دور و اسپیندل‌های مناسب در هر بریکس، با توجه به بالاترین درصد گشتاور برای اندازه‌گیری ویسکوزیته در دوره‌های مختلف، اسپیندل مربوطه به هر بریکس روی دستگاه سوار و سپس اسپیندل داخل بشر ۱۰۰۰ ml محتوی نمونه رب با بریکس ۱۲ و دمای ثابت ۲۵ °C قرار گرفت. کل مجموعه درون بن ماری (ساخت شرکت WINDAUS آلمان) قرار دارد. این دستگاه قادر به ترسیم نمودار ویسکوزیته ی سینماتیکی ($\frac{mm^2}{s}$) بر اساس دور در دقیقه (rpm) می‌باشد. (از دور rpm ۶۸ آغاز و به صورت ramp مرتباً ۴/۵ دور در دقیقه به دور قبلی افزوده تا rpm ۲۰۰) با رسم این نمودار و مشخص شدن نقاط توسط دستگاه، داده‌های ویسکوزیته در هر دور، مشخص و سپس داده‌ها وارد صفحه ی گسترده نرم افزار Excel گردید. به همین ترتیب برای دماهای ۳۵ و ۴۵ °C و بریکس‌های ۱۶ و ۲۰ نیز مقادیر ویسکوزیته بر حسب دور در ۳ تکرار به دست آمد. سپس برای پیدا کردن $\dot{\gamma}$ از رابطه ی (۳) که برای یافتن سرعت برشی سیال قانون توان در ویسکومتر دورانی ارائه شده است، استفاده گردید (۹). پس از محاسبه مقدار $4\pi N$ برای هر دور و با فرض این که سیال از مدل قانون توان پیروی می‌کند، طبق روابط زیر عمل گردید:

۳ رابطه بین دور و سرعت برشی در سیالات قانون توان (۹)

$$\dot{\gamma} = \frac{4\pi N}{n}$$

$$\eta = K\dot{\gamma}^{n-1}$$

رابطه بین ویسکوزیته ی ظاهری و سرعت برشی در سیالات قانون توان (۹)

n = شاخص رفتار جریان $N(\text{rps})$ = دور در ثانیه

با جای گذاری رابطه ی ۳ در ۲ می‌توان به رابطه ی زیر رسید :



$$\eta = K \left(\frac{4\pi N}{n} \right)^{n-1}$$

۴

با گرفتن لگاریتم طبیعی از رابطه ی فوق ، خواهیم داشت:

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

۵

$$Y = b + ax$$

۶

با رسم نمودار $\ln \eta$ بر حسب $\ln 4\pi N$ در هر بریکس و دما با استفاده از شیب خط حاصل، n یا همان شاخص رفتار جریان و با کمک عرض از مبدأ K ، ضریب پایداری تعیین گردید.

۲-۱- برآزش ویسکوزیته و سرعت برشی حاصل با مدل بینگهام ، کاسون ، هرشل بالکلی و قانون توان:

پس از محاسبه ی ویسکوزیته ی ظاهری و سرعت برشی در سه بریکس ۱۲، ۱۶ و ۲۰ و دماهای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ °C در ۳ تکرار، با استفاده از نرم افزار MATLAB7 و تبدیل رابطه ی ویسکوزیته به سرعت برشی در مدل قانون توان، هرشل بالکلی، بینگهام و کاسون به روابط تعریف شده برای این نرم افزار (جدول ۱)، داده‌ها را توسط این نرم افزار با ۴ مدل فوق برآزش نموده و سپس با رسم نمودار هر مدل با کمک مقدار Adjust-R-square و R-square حاصل، میزان برآزش داده‌ها با ۴ مدل جهت تعیین بهترین مدل بررسی گردید.

جدول ۱: روابط تعریف شده در نرم افزار matlab7 برای برآزش داده ها

| | | |
|---|--|---------------------|
| $\eta = K \dot{\gamma}^{n-1}$ | $y = ax^b$ | مدل قانون توان |
| $\eta = \frac{\sigma_0}{\dot{\gamma}} + K \dot{\gamma}^{n-1}$ | $y = a(x^{-1} + bx^c)$ | مدل هرشل بالکلی |
| $\eta = \frac{\sigma_0}{\dot{\gamma}} + \mu_{pl}$ | $y = ax^{-1} + b$ | مدل بینگهام پلاستیک |
| $\eta^{1/2} = \frac{\sigma_0^{1/2}}{\dot{\gamma}^{1/2}} + K$ | $y = \frac{a}{x} + b^2 + 2b\left(\frac{a}{x}\right)^{1/2}$ | مدل کاسون |

۲-۲- روش کار با قوام سنج بوستویک

پس از قرار دادن قوام سنج بوستویک (ساخت شرکت SKOKIE-ILLINOIS امریکا) در وضعیت تراز، دریچه را بسته ، نمونه آماده شده در قبل با بریکس‌های ۱۲، ۱۶ و ۲۰ و دماهای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ °C نمونه رب در داخل مخزن کوچک یا بخش کوچک بوستویک ریخته و سطح روی آن صاف گردید. سپس ضامن دریچه زده شده (به طور همزمان کرنومتر نیز باید شروع به کار کند) طولی که رب روی کف بوستویک حرکت می‌کند پس از زمان های ۵، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ ثانیه اندازه گیری و یادداشت گردید. پائولو پرونا (۲۰۰۵) برای تعیین همبستگی بین درجه ی بوستویک و پارامترهای رئولوژیکی در پوره ی میوه جات از فواصل زمانی فوق استفاده کرد (۸). برای تعیین سرعت برشی اعمال شده بر سیال در قوام سنج

$$\dot{\gamma} = \frac{L^2}{qt}$$

بوستویک از رابطه ی (۱) استفاده گردید (۶).



L = مسافت طی شده توسط سیال بر حسب متر در قوامسنج بوستویک

q = حجم ماده در واحد عرض بوستویک

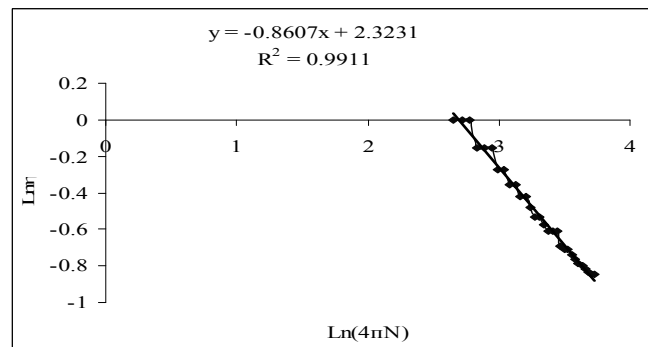
$$\left(\frac{0.038 \times 0.05 \times 0.05}{0.05} \right) = 19 \times 10^{-4} m^2 \quad \leftarrow$$

t = زمان جاری شدن سیال بر حسب ثانیه در قوامسنج بوستویک

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج حاصل از ویسکومتر دورانی

با رسم نمودار $\ln \eta$ بر حسب $\ln 4\pi N$ در هر بریکس و دما با استفاده از شیب خط حاصل، n یا همان شاخص رفتار جریان و با کمک عرض از مبدأ K ، ضریب پایداری تعیین شد (شکل ۱). همچنین با توجه به این مطلب که بهترین خط برازش شده، خطی است که مقدار ضریب تبیین آن به یک نزدیک باشد، می‌توان دریافت که سیال تا چه حد از مدل قانون توان پیروی کرده است. بدین ترتیب برای هر بریکس و هر دما و هر تکرار یک شاخص جریان (n) و یک ضریب پایداری (K) حاصل گردید (جدول ۲).

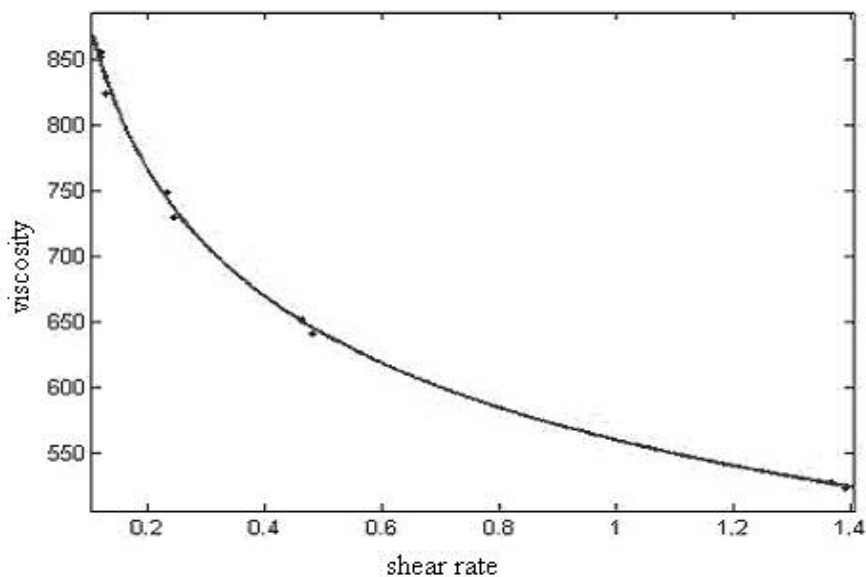


شکل ۱: لگاریتم ویسکوزیته ی ظاهری بر اساس لگاریتم $4\pi N$ در بریکس ۱۲، دمای $25^\circ C$

جدول ۲: میانگین پارامترهای رئولوژیکی به دست آمده از ویسکومتر دورانی در بریکس ها و دماهای مختلف

| R^2 | n | $K(pa.s^n)$ | دما ($^\circ C$) | بریکس |
|--------|--------|-------------|--------------------|-------|
| ۰/۹۹۲۵ | ۰/۱۳۸۵ | ۵۶/۷۷۸۶ | ۲۵ | ۱۲ |
| ۰/۹۹۱۲ | ۰/۱۵۸۹ | ۴۴/۶۳۰۶ | ۳۵ | ۱۲ |
| ۰/۹۸۷۵ | ۰/۱۴۷۸ | ۴۲/۸۴۸ | ۴۵ | ۱۲ |
| ۰/۹۸۹۵ | ۰/۱۱۹۱ | ۱۵۷/۲۰۳۳ | ۲۵ | ۱۶ |
| ۰/۹۹۳۷ | ۰/۱۱۹۲ | ۱۵۲/۶۸۸ | ۳۵ | ۱۶ |
| ۰/۹۸۸ | ۰/۱۱۶۹ | ۱۴۷/۲۲۸۳ | ۴۵ | ۱۶ |
| ۰/۹۸۵۳ | ۰/۱۳۳۹ | ۲۴۸/۶۰۳۳ | ۲۵ | ۲۰ |
| ۰/۹۷۶۲ | ۰/۱۵۵۶ | ۱۸۶/۶۳۵ | ۳۵ | ۲۰ |
| ۰/۹۷۱۹ | ۰/۱۵۲۲ | ۱۶۰/۰۴ | ۴۵ | ۲۰ |

۳-۲- برازش ویسکوزیته و سرعت برشی حاصل با مدل بینگهام ، کاسون ، هرشل بالکلی و قانون توان؛ پس از محاسبه ی ویسکوزیته و سرعت برشی در ۳ بریکس و ۳ دما و برازش داده‌های حاصل با استفاده از نرم‌افزار MATLAB7 و رسم نمودار (شکل ۲، برای بریکس ۱۲ و دمای ۲۵ به عنوان نمونه آورده شده است) هر مدل با کمک مقدار Adjust-R-square و R-square حاصل، میزان برازش داده‌ها با ۴ مدل بررسی گردید. لازم به توضیح می‌باشد که در نمودار زیر ویسکوزیته بر حسب pa.S و سرعت برشی بر حسب S^{-1} می‌باشد.



شکل ۲: برازش داده‌ها با مدل پاورلا ، بریکس ۱۲ و دمای ۲۵ °C

۳-۳- نتایج برازش ویسکوزیته و سرعت برشی حاصل با مدل بینگهام ، کاسون ، هرشل بالکلی و قانون توان با کمک نمودار حاصل از برازش داده‌ها با ۴ مدل فوق و مقدار Adjust-R-square و R-square به دست آمده برای هر بریکس ، جدول‌های زیر حاصل شدند:



جدول ۳: میزان برازش داده ها با مدل های رتولوژیکی در بریکس ۱۲ و دماهای ۲۵.۳۵ °C و ۴۵

| Adjust-R-square | R-square | مدل رتولوژیکی | دما (°C) | بریکس |
|-----------------|----------|-----------------|----------|-------|
| ۰/۹۹۷۶ | ۰/۹۹۷۸ | قانون توان | ۲۵ | ۱۲ |
| ۰/۹۹۶۷ | ۰/۹۹۷۳ | هرشل بالکی | | |
| ۰/۹۱۶۲ | ۰/۹۲۳۷ | بینگهام پلاستیک | | |
| ۰/۹۸۳۹ | ۰/۹۸۵۳ | کاسون | | |
| ۰/۹۹۵۱ | ۰/۹۹۵۵ | قانون توان | ۳۵ | |
| ۰/۹۹۳۸ | ۰/۹۹۴۹ | هرشل بالکی | | |
| ۰/۹۱۴ | ۰/۹۲۱۸ | بینگهام پلاستیک | | |
| ۰/۸۳۹۲ | ۰/۸۵۳۸ | کاسون | | |
| ۰/۹۹۹۵ | ۰/۹۹۹۵ | قانون توان | ۴۵ | |
| ۰/۹۹۸ | ۰/۹۹۸۴ | هرشل بالکی | | |
| ۰/۹۱۱۳ | ۰/۹۱۹۴ | بینگهام پلاستیک | | |
| ۰/۹۸۲۷ | ۰/۹۸۴۳ | کاسون | | |
| ۰/۹۸۹۶ | ۰/۹۹۰۵ | قانون توان | ۲۵ | ۱۶ |
| ۰/۹۸۸۴ | ۰/۹۹۰۵ | هرشل بالکی | | |
| ۰/۹۱۶۵ | ۰/۹۲۴۱ | بینگهام پلاستیک | | |
| ۰/۹۷۵۵ | ۰/۹۷۷۷ | کاسون | | |
| ۰/۹۹۳۳ | ۰/۹۹۴ | قانون توان | ۳۵ | |
| ۰/۹۹۱۸ | ۰/۹۹۳۳ | هرشل بالکی | | |
| ۰/۸۹۳۶ | ۰/۹۰۳۳ | بینگهام پلاستیک | | |
| ۰/۹۶۸۳ | ۰/۹۷۱۲ | کاسون | | |
| ۰/۹۹۴۷ | ۰/۹۹۵۲ | قانون توان | ۴۵ | |
| ۰/۹۹۳۵ | ۰/۹۹۴۷ | هرشل بالکی | | |
| ۰/۹۰۵۳ | ۰/۹۱۳۹ | بینگهام پلاستیک | | |
| ۰/۹۷۴۵ | ۰/۹۷۶۸ | کاسون | | |
| ۰/۲۹۶۱ | ۰/۳۶۰۳ | قانون توان | ۲۵ | ۲۰ |
| ۰/۶۴۰۴ | ۰/۷۰۵۸ | هرشل بالکی | | |
| ۰/۱۸۲۸ | ۰/۲۵۶۶ | بینگهام پلاستیک | | |
| ۰/۲۴۰۷ | ۰/۳۰۹۷ | کاسون | | |
| ۰/۲۳۶۴ | ۰/۳۰۵۸ | قانون توان | ۳۵ | |
| ۰/۲۰۹۲ | ۰/۳۵۳ | هرشل بالکی | | |
| ۰/۲۷۷۵ | ۰/۳۴۳۲ | بینگهام پلاستیک | | |
| ۰/۲۶۰۳ | ۰/۳۲۷۵ | کاسون | | |
| ۰/۹۴۸۹ | ۰/۹۵۳۵ | قانون توان | ۴۵ | |
| ۰/۹۴۱۷ | ۰/۹۵۲۳ | هرشل بالکی | | |
| ۰/۸۰۱۶ | ۰/۸۱۹۶ | بینگهام پلاستیک | | |
| ۰/۸۹۸۹ | ۰/۹۰۸۱ | کاسون | | |



با توجه به جدول فوق و نتایج به دست آمده ، بالاترین Adjust-R-square در بریکس ۱۲ و ۱۶ بوده و بریکس ۱۲ مناسب ترین بریکس برای برازش داده‌ها با مدل های رئولوژیک می‌باشد ، ولی بریکس ۲۰ مناسب برای برازش نیست و بهترین مدل برازش به ترتیب مدل قانون توان و هرشل بالکلی بوده که با نتایج تولدو و فیتو نیز همخوانی دارد (۵،۴). در جدول زیر پارامترهای رئولوژیکی حاصل بر اساس مدل‌های پاورلا و هرشل - بالکلی ارائه شده است.

جدول ۴: تعیین پارامترهای رئولوژیکی مدل‌های قابل قبول در بریکس ۱۲ و ۱۶

| هرشل بالکلی | | | قانون توان | | سرعت برشی (s^{-1}) | دما ($^{\circ}C$) | بریکس |
|-----------------|--------|-----------|------------|-----------|---------------------------|---------------------|-------|
| σ_0 (Pa) | n | $K pas^n$ | n | $K pas^n$ | | | |
| ۴/۲۲۲ | ۰/۸۲۰۶ | ۵۵۵/۶۱۵ | ۰/۸۰۵۵ | ۵۵۹/۵ | ۰/۱۱۷-۱/۳۹۲۱ | ۲۵ | ۱۲ |
| ۴/۶۸۱ | ۰/۸۱۹۸ | ۵۲۲/۳۹۹ | ۰/۸۰۵۶ | ۵۲۸/۹ | ۰/۱۴۷۸-۱/۶۷۱۲ | ۳۵ | |
| ۴/۵۸۴ | ۰/۸۲۲۱ | ۴۹۹/۱۹۷۶ | ۰/۸۰۸۵ | ۵۰۵/۵ | ۰/۱۵۷۵-۱/۸۰۶۴ | ۴۵ | |
| ۰/۷۴۰۲ | ۰/۸۵۵۷ | ۹۹۰/۳۸۷ | ۰/۸۵۰۴ | ۹۸۵ | ۰/۰۳۱۰-۰/۲۸۴۶ | ۲۵ | ۱۶ |
| ۰/۵۵۵۷ | ۰/۸۴۶۱ | ۹۳۹/۱۳۳ | ۰/۸۴۲۵ | ۹۳۶/۵ | ۰/۰۳۴۸-۰/۳۱۸۴ | ۳۵ | |
| ۰/۸۰۳۹ | ۰/۸۴۴۳ | ۸۹۶/۳۴۸ | ۰/۸۳۹۳ | ۸۹۲/۸ | ۰/۰۳۸۲-۰/۳۶۶۴ | ۴۵ | |

نتایج حاصل از جدول فوق ، نشان داد که مقدار ضریب پایداری (K) در مدل قانون توان با افزایش بریکس ، افزایش یافته و با افزایش دما، کاهش می‌یابد. ولی مقدار شاخص رفتار جریان (n) فقط با افزایش بریکس ، افزایش می‌یابد و با افزایش دما ، در هر بریکس تغییرات منظمی را دنبال نمی‌کند. این مطلب ، نتایج فیتو و همکاران را در سال ۱۹۸۳ (۴) و نتایج تولدو در سال ۱۹۸۰ را تایید می‌کند (۵). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقدار K وابسته به بریکس و دما و مقدار n تنها وابسته به بریکس است.

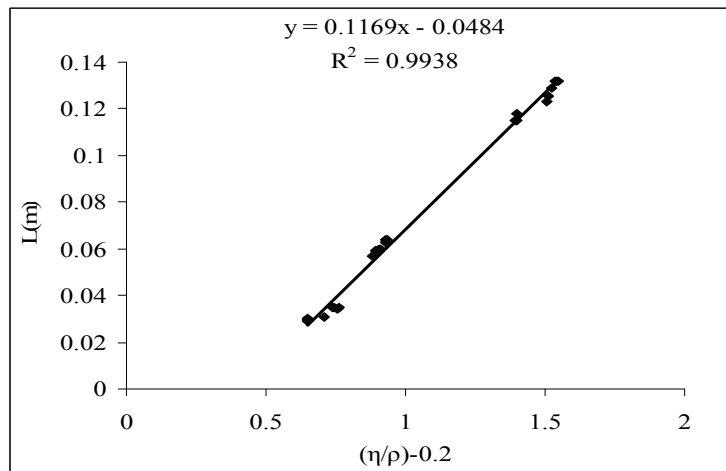
۳-۴- تعیین همبستگی بین دو دستگاه قوام‌سنج بوستویک و ویسکومتر دورانی

همبستگی بین دو دستگاه در ۴ زمان مختلف به صورت جداگانه تعیین گردید. سرعت برشی توسط رابطه ی (۱) با کمک طول‌های به دست آمده از بوستویک و ۴ زمان ۱۵،۵، ۳۰ و ۶۰ ثانیه به دست آمد. مقادیر حاصل به همراه پارامترهای رئولوژیکی به دست آمده از ویسکومتر دورانی در رابطه‌ی (۲) قرار داده شد. به این ترتیب مقدار η' به دست آمد و دانسیته نیز در بریکس و دمای مورد نظر محاسبه گردید. محاسبات انجام شده برای تعیین همبستگی بین قوام‌سنج بوستویک و ویسکومتر دورانی در جدول ۵ مشاهده می‌شود و در نهایت با رسم نمودار L بر حسب $\left(\frac{\eta}{\rho}\right)^{-0.2}$ همبستگی و میزان همبستگی بین دو دستگاه تعیین گردید (شکل ۳).



جدول ۵: محاسبات انجام شده برای تعیین همبستگی بین قوام سنج بوستویک و ویسکومتر دورانی در ۳۰ ثانیه

| $L(cm)$ | $L(m)$ | qt | $\dot{\gamma}(s^{-1})$ | $n-1$ | n | $k(pa.s^n)$ | $\eta(pa.s)$ | $\rho(\frac{kg}{m^3})$ |
|---------|--------|-------|------------------------|---------|--------|-------------|--------------|------------------------|
| 11.5 | 0.115 | 0.057 | 0.232018 | -0.8607 | 0.1393 | 55.6788 | 195.788 | 1047.6 |
| 11.8 | 0.118 | 0.057 | 0.244281 | -0.8599 | 0.1401 | 57.768 | 194.1071 | 1047.6 |
| 11.5 | 0.115 | 0.057 | 0.232018 | -0.8639 | 0.1361 | 56.889 | 200.9809 | 1047.6 |
| 12.3 | 0.123 | 0.057 | 0.265421 | -0.8413 | 0.1587 | 43.684 | 133.3416 | 1039.2 |
| 12.55 | 0.1255 | 0.057 | 0.27632 | -0.8422 | 0.1578 | 44.894 | 132.6266 | 1039.2 |
| 1.9 | 0.129 | 0.057 | 0.291947 | -0.8398 | 0.1602 | 45.314 | 127.4294 | 1039/2 |
| 13.2 | 0.132 | 0.057 | 0.305684 | -0.8529 | 0.1471 | 42.648 | 117.1951 | 1024.4 |
| 13.2 | 0.132 | 0.057 | 0.305684 | -0.8488 | 0.1512 | 43.648 | 119.3616 | 1024.4 |
| 13.2 | 0.132 | 0.057 | 0.305684 | -0.8549 | 0.1451 | 42.248 | 116.3714 | 1024.4 |
| 5.7 | 0.057 | 0.057 | 0.057 | -0.8828 | 0.1172 | 156.96 | 1968.352 | 1061.05 |
| 5.9 | 0.059 | 0.057 | 0.06107 | -0.8798 | 0.1202 | 158.96 | 1860.01 | 1061.05 |
| 5.9 | 0.059 | 0.057 | 0.06107 | -0.8802 | 0.1198 | 155.69 | 1823.786 | 1061.05 |
| 5.9 | 0.059 | 0.057 | 0.06107 | -0.8841 | 0.1159 | 153.853 | 1822.025 | 1058.95 |
| 6 | 0.06 | 0.057 | 0.063158 | -0.8814 | 0.1186 | 152.853 | 1744.123 | 1058.95 |
| 6 | 0.06 | 0.057 | 0.063158 | -0.8769 | 0.1231 | 151.358 | 170./73 | 1058.95 |
| 6.3 | 0.063 | 0.057 | 0.069632 | -0.8853 | 0.1147 | 146.349 | 1548.294 | 1057.2 |
| 6.4 | 0.064 | 0.057 | 0.07186 | -0.8839 | 0.1161 | 148.349 | 1520.679 | 1057.2 |
| 6.4 | 0.064 | 0.057 | 0.07186 | -0.8799 | 0.1201 | 146.987 | 1490.932 | 1057.2 |
| 2.9 | 0.029 | 0.057 | 0.014754 | -0.8627 | 0.1373 | 248.63 | 9445.507 | 1067.65 |
| 3 | 0.03 | 0.057 | 0.015789 | -0.8709 | 0.1291 | 249.63 | 9254.189 | 1067.65 |
| 2.95 | 0.0295 | 0.057 | 0.015268 | -0.8645 | 0.1355 | 247.55 | 9200.141 | 1067.65 |
| 3.1 | 0.031 | 0.057 | 0.01686 | -0.8466 | 0.1534 | 186.047 | 5898.923 | 1061.45 |
| 3.5 | 0.035 | 0.057 | 0.021491 | -0.8453 | 0.1547 | 186.69 | 4795.795 | 1061.45 |
| 3.5 | 0.035 | 0.057 | 0.021491 | -0.8411 | 0.1589 | 187.168 | 4731.15 | 1061.45 |
| 3.45 | 0.0345 | 0.057 | 0.020882 | -0.8481 | 0.1519 | 159.49 | 4243.676 | 1060.75 |
| 3.45 | 0.0345 | 0.057 | 0.020882 | -0.8502 | 0.1498 | 160.3 | 4300.023 | 1060.75 |
| 3.5 | 0.035 | 0.057 | 0.021491 | -0.845 | 0.155 | 160.33 | 4113.903 | 1060.75 |



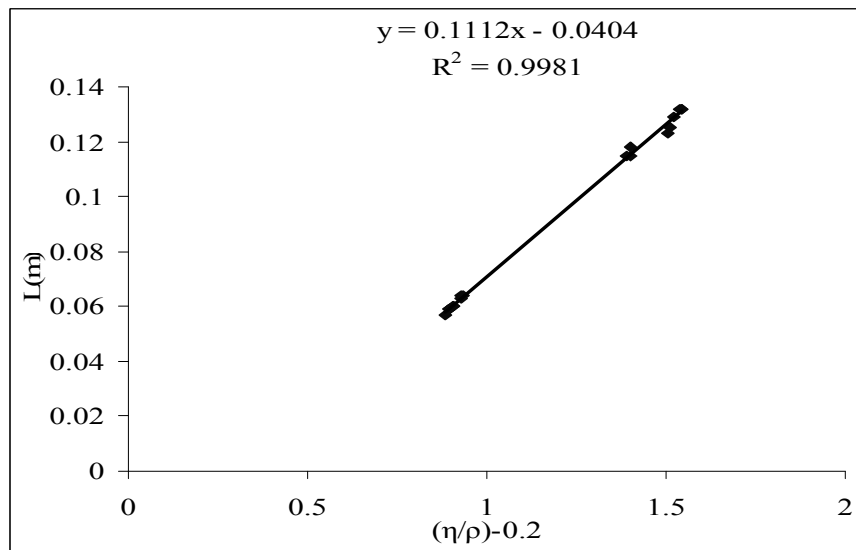
شکل ۳: طول پوستویک بر حسب $\left(\frac{\eta}{\rho}\right)^{-0.2}$ برای تعیین همبستگی دو دستگاه در ۳۰ ثانیه

جدول ۶: میزان همبستگی دو دستگاه با بریکس ۱۶، ۱۲ و ۲۰

| R^2 | معادله خط | زمان (ثانیه) |
|--------|------------------------|--------------|
| ۰/۹۸۶۳ | $- ۰/۱x = ۰/۲۲۶۴ y$ | ۵ |
| ۰/۹۸۰۸ | $- ۰/۰۹۷۳x = ۰/۲۷۰۸ y$ | ۱۵ |
| ۰/۹۹۳۸ | $- ۰/۰۴۸۴x = ۰/۱۱۶۹ y$ | ۳۰ |
| ۰/۹۹۱۸ | $- ۰/۰۴۷۱x = ۰/۱۳۱۳ y$ | ۶۰ |

با توجه به جدول فوق ضریب همبستگی میان دو دستگاه ویسکومتر دورانی و قوامسنج پوستویک بالاتر از ۰/۹ است و بهترین زمان برای تعیین همبستگی بین دو دستگاه ۳۰ ثانیه بوده که می‌توان با کمک معادله ی خط حاصل و با داشتن دانسیته ی رب گوجه فرنگی در هر بریکس و دما و اندازه گیری طول بعد از ۳۰ ثانیه در قوامسنج پوستویک و تعیین عدد پوستویک ویسکوزیته ی ظاهری را برای رب گوجه فرنگی تعیین کرد.

همچنین بیش ترین همبستگی در ۳۰ ثانیه حاصل گردید که یافته های مک کارتی (۲۰۰۴) را به طور دقیق تری تایید می‌کند (۶). با توجه به نتایج به دست آمده در قسمت قبل مناسب ترین بریکس برای کار کردن با قوامسنج پوستویک و مدل‌سازی سیال با مدل پاورلا، بریکس ۱۲ تا ۱۶ است. پس داده‌های مربوط به بریکس ۲۰ را حذف کرده و مطابق قسمت قبل با رسم نمودار میزان همبستگی بین دو دستگاه تعیین (شکل ۵) و نتایج حاصل در جدول ۷ وارد شد.



شکل ۴: طول پوستویک بر حسب $\left(\frac{\eta}{\rho}\right)^{-0.2}$ برای تعیین همبستگی دو دستگاه در ۳۰ ثانیه، بریکس ۱۲ و ۱۶

جدول ۷: میزان همبستگی دو دستگاه با بریکس ۱۲ و ۱۶ $\left(\frac{\eta}{\rho}\right)^{-0.2}$ و $y = L$

| R^2 | معادله خط | زمان (ثانیه) |
|--------|-------------------------|--------------|
| ۰/۹۹۵۸ | $y = ۰/۲۱۲۳ x - ۰/۰۸۶۵$ | ۵ |
| ۰/۹۹۴۹ | $y = ۰/۲۴۹۱ x - ۰/۰۸$ | ۱۵ |
| ۰/۹۹۸۱ | $y = ۰/۱۱۱۲ x - ۰/۰۴۰۴$ | ۳۰ |
| ۰/۹۹۷۳ | $y = ۰/۱۲۳۷ x - ۰/۰۳۷۶$ | ۶۰ |

با توجه به جدول حاصل، مشاهده گردید که بالاترین ضریب تبیین (R^2) مربوط به زمان ۳۰ ثانیه بوده است که باز هم زمان ۳۰ ثانیه را برای تعیین همبستگی بین قوام سنج پوستویک و ویسکومتر دورانی، تایید می‌کند. بنابراین، با یک بار اندازه‌گیری طول حرکت در پوستویک پس از ۳۰ ثانیه و دانسیته ی رب گوجه فرنگی می‌توان با کمک معادله ی حاصل، مقدار ویسکوزیته را محاسبه کرد.

۴- منابع

۱. قنبرزاده، ب. و قنبرزاده، ص. ۱۳۸۳. فیزیک مواد غذایی، چاپ اول، حیدری، صفحات: ۱۶۸ - ۱۷۸.
2. Abu - Jdayil, B., Banat, f. and Jumah, R. 2004. A comparative study of rheological characteristics of tomato paste and tomato powder solutions. International Journal of Food Properties, Vol. 7, No.3, PP. 483- 497
3. Bourne, M.c. 2002. Food texture and viscosity concept and measurement. Second Edition, PP. 213 – 216.
4. Fito, P.J. and Clemente, G. and Sanz F.J. Rheological behavior of tomato concentrate, J. Food Eng., 2:51-62.
5. Hayes, W. A. and Smith, P.G. and Morris, A. E. 1998. The production and quality of tomato concentrates, Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 38 (7): 537 – 564.



6. Mc Carthy , K . L . and Seymour , J . D. 1993. A fundamental approach for the relationship between the bostwick measurement and newtonian fluid viscosity. J. of Texture Studies, Vol(No) : 24 : 1- 10 .
7. Mc Carthy, K. L.and Mc Carthy,M.J. 2005.In-line bostwick measurement using a micro NMR sensor tomato processing. Research Proposal ,Available at: www.cifp.com.
8. Perona, P. 2005. Bostwick degree and rheological properties. J.Applied Rheology, Vol.15, Issue.4,PP.218-229
- 9.Steffe, J. F. 1996. Rheologicalm methods in food process engineering.2 th Edition, Freeman Press .