

## مدل سازی رفتار جریان و شاخص های رئولوژیکی، و بهینه سازی فرمولاسیون بستنی با استفاده از روش سطح پاسخ

فریده طباطبایی یزدی<sup>۱\*</sup>، علی الغونه<sup>۲</sup>، دیاکو خدایی<sup>۳</sup>، بهروز عزیزاده بهبهانی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار و عضو هیئت علمی گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشجوی دکتری علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت: ۹۳/۵/۱۲ تاریخ پذیرش: ۹۳/۹/۲۴)

### چکیده

بستنی یک آمیخته کلونیدی پیچیده می باشد که در آن قطرات چربی و سلول های هوا در فاز نیمه منجمدی پراکنده شده اند. در این پژوهش تاثیر چربی در چهار سطح (۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد)، شیره انگور در سه سطح (۰، ۹ و ۱۸ درصد) و دو نوع هیدرو کلونید (کربوکسی متیل سلولز و بالنگو) هر کدام در چهار سطح (۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ درصد) با استفاده از روش سطح پاسخ بر خصوصیات جریانی بستنی و پذیرش کلی آن مورد آزمون قرار گرفت و در انتها فرمولاسیون بهینه بستنی با استفاده از نرم افزار *Design expert* تعیین گردید. رفتار جریان تمام نمونه ها با استفاده از مدل های توان، هرشل بالکلی، کاسون و بینگهام بررسی شد. بر اساس مقدار ضریب تبیین ( $\geq 0/99$ ) و ریشه میانگین خطا ( $\leq 0/9314$ ) مشخص شد که مدل توان توانایی بالایی در توصیف رفتار جریان نمونه های بستنی دارد. همچنین نتایج نشان داد مدل کاسون مدل معنی داری برای بررسی تنش تسلیم نمونه های بستنی می باشد. نمونه های حاوی صمغ بالنگو دارای ضریب قوام و تنش تسلیم بالاتر و شاخص رفتار جریان کمتری نسبت به نمونه های حاوی صمغ کربوکسی متیل سلولز بودند. لازم به ذکر است که تنش تسلیم به دست آمده با استفاده از مدل هرشل بالکلی منفی می باشد چیزی که فاقد معنای فیزیکی می باشد. تفاوت معنی داری بین نتایج پذیرش کلی نمونه های حاوی کربوکسی متیل سلولز و بالنگو شیرازی مشاهده نشد. میزان تابع مطلوبیت برای عملیات بهینه سازی ۰/۹۳ می باشد که خود نشان دهنده دقت بالای عملیات بهینه سازی است و همچنین فرمولاسیون بهینه عبارت است از غلظت چربی ۵/۶٪، غلظت صمغ بالنگو ۰/۶٪، میزان شیره انگور ۱۸٪.

**کلید واژگان:** مدل سازی، بستنی، روش رویه سطح پاسخ، بالنگو، کربوکسی متیل سلولز

\* مسئول مکاتبات: tabatabai@um.ac.ir

## ۱- مقدمه

بستنی، مخلوط هوا داده شده و نیمه منجمدی از ترکیب شیر، مواد شیرین کننده، پایدار کننده، امولسیفایر و مواد طعم دهنده می باشد. چربی از مهمترین اجزای آمیخته بستنی به شمار می رود و بر خصوصیات مختلف آن از جمله طعم، رنگ، خواص حرارتی، بافت و ویژگی های رئولوژیکی موثر می باشد، بنابراین حذف آن به راحتی از فرمولاسیون فرآورده های کم چرب امکان پذیر نبوده، از این رو استفاده از جایگزین چربی پیشنهاد می شود [۱].

یک دسته از ترکیباتی که قابلیت کاربرد به عنوان جایگزین چربی را دارند هیدروکلوئیدها هستند. این مواد اثر مستقیمی بر طعم و عطر مواد غذایی ندارند، ولی قادر به تشکیل ژل، نگهداری آب، تثبیت امولسیون و نگهداری طعم در این فرآورده ها می باشند [۲]. رومه و همکاران (۲۰۰۲)، با کاهش چربی فرمولاسیون شاهد از طریق جایگزین کردن سطوح متفاوتی از نشاسته ژلاتینه مشاهده کردند که این ماده در نسبت ۵۰ درصد، جایگزین ارزان قیمت و مناسبی برای چربی بوده و ضمن حفظ خصوصیات فیزیکوشیمیایی و کیفی بستنی، میزان کالری آن را به طور قابل توجهی کاهش می دهد [۳]. تارگا و کاستل (۲۰۰۵)، گزارش کردند که افزودن صمغ کاراگینان، باعث افزایش گرانیوی، کاهش شدت شیرینی، عطر و طعم وانیلی شد و کاربرد آن تا سطح ۰/۰۶ درصد، افزایش ویژگی خامه ای شدن را به دنبال دارد [۴]. با توجه به اینکه اغلب پایدار کننده های تجاری، وارداتی می باشند، از این رو بررسی امکان کاربرد ترکیبات هیدروکلوئیدی گیاهان بومی ایران (صمغ دانه بالنگو) ضروری می باشد.

دانه های حاوی هیدروکلوئید که در نواحی مختلف ایران وجود دارند، دارای پلی ساکاریدهای مهم می باشند (عموماً گالاتومانان) و صمغ استخراجی از آن ها را می توان به عنوان منابع جدید هیدروکلوئیدی معرفی کرد. از جمله این هیدروکلوئید ها دانه بالنگو شیرازی می باشد. بالنگوی شیرازی، گیاهی دارویی از تیره نعنائیان است دانه های این گیاه حاوی مقادیر زیادی موسیلاژ هستند که به طور سنتی در درمان نارسایه های همچون ناراحتی های عصبی، کبدی و کلیوی به کار می روند (۵). نتایج تحقیق رضوی و همکاران (۲۰۱۳) بر روی خصوصیات رئولوژیکی، فعال سطحی و ساختاری صمغ دانه بالنگو نشان داد که این صمغ حاوی ۸/۵۱% رطوبت،

۸/۲۴% خاکستر، ۲/۷۱% پروتئین، ۷۵/۸۷% کربوهیدرات و ۲۰/۳۳% اورونیک اسید است.

این دانه ها در هنگام خیس شدن در آب به سرعت آب جذب نموده و محلول چسبنده، کدر و بی مزه تولید می نمایند، که به علت تولید مقادیر بالای موسیلاژ می تواند به عنوان یک منبع جدید هیدروکلوئید در فرمولاسیون مواد غذایی به کار رود. بررسی ها نشان داده صمغ دانه بالنگو رفتار شل شونده با برش دارد و ضریب قوام و شاخص رفتار جریان محلول ۱ w/w /۱ آن بر اساس قانون توان به ترتیب برابر  $1.84 \text{ Pa.s}$  و  $0.36$  و گرانیوی ظاهری محلول ۱ w/w /۱ صمغ دانه بالنگو در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و درجه برش  $6.16 \text{ s}^{-1}$  برابر با  $1.84 \text{ Pa.s}$  گزارش شده است [۵]. این نتایج نشان می دهد صمغ دانه بالنگو مشابه صمغ های تجاری می تواند به عنوان قوام دهنده، پایدارکننده و نگهدارنده آب به کار برده شود.

شکر نیز یکی دیگر از عوامل موثر در کیفیت بستنی است که علاوه بر نقش شیرین کنندگی دارای نقش حجیم کنندگی، تثبیت آب و کنترل نقطه انجماد در بستنی می باشد اما به دلیل ارتباط با برخی امراض نظیر فشار خون، بیماری های قلبی و همچنین عدم خاصیت احیا کنندگی (شنی شدن بافت) محققین به دنبال جایگزین مناسب شکر در محصولات غذایی می باشند [۶]. شیره انگور یکی از فرآورده های سنتی انگور است که از لحاظ تغذیه ای بسیار سودمند و حاوی ویتامین ها، املاح و مقدار زیادی کربوهیدرات های ساده بوده و در نتیجه مانع از شنی شدن بافت ماده غذایی می شود، در نتیجه شیره انگور به عنوان یک شیرین کننده طبیعی و جایگزین شکر در صنایع غذایی مطرح است.

مطالعه خصوصیات رئولوژیکی هیدروکلوئیدها، زمانی که به منظور اصلاح ویژگی های بافتی مواد غذایی به کار می روند، حائز اهمیت است. خصوصیات رئولوژیکی برای محاسبات در فرایندهایی نظیر پمپ کردن، فیلتراسیون، عصاره گیری و تصفیه که شامل جریان مایع می باشند مورد نیاز بوده و نقش مهمی در آنالیز شرایط جریان فرایندهای غذایی نظیر پاستوریزاسیون، تبخیر و خشک کردن دارند [۷]. محققان بسیاری به بررسی خواص رئولوژیکی مستقل از زمان مواد غذایی پرداخته اند که از جمله می توان به بررسی خواص جریان مخلوط خمیر کنجد و شیره انگور [۸]، بررسی رفتار رئولوژیکی آمیخته های بستنی غنی شده با فیبر های رژیمی

های بستنی رفتار غیر نیوتونی و ضعیف شونده با برش را از خود نشان می‌داد، به منظور توصیف رفتار رئولوژیکی داده‌های آزمون از مدل‌های توان، هرشل بالکلی، بینگهام پلاستیک و کاسون استفاده گردید (۱۱):

$$\tau = k_p \dot{\gamma}^{n_p} \quad (1)$$

(معادله ۱)

در این معادله  $k_p$  ضریب قوام ( $Pa \cdot s^n$ ) و  $n_p$  شاخص رفتار جریان (بدون بعد) می‌باشد.  $k_p$  بزرگی گرانروی سیال و  $n_p$  ویژگی رفتار سیال را نشان می‌دهد.

$$\tau = \tau_0 + k_B \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

در صورتی که نمونه‌ای دارای تنش تسلیم<sup>۳</sup> باشد، می‌توان این مقدار تنش را به مدل قانون توان اضافه کرد که در نتیجه مدل هرشل-بالکلی حاصل می‌شود.

(معادله ۲)

در معادله فوق  $\tau_{0H}$ ،  $K_H$  و  $n_H$  به ترتیب تنش تسلیم ( $Pa$ )، ضریب قوام ( $Pa \cdot s^n$ ) و شاخص رفتار جریان مدل هرشل بالکلی می‌باشد.

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

اگر نمونه مورد نظر بر اساس مدل نیوتونی دارای تنش تسلیم باشد، به آن سیال پلاستیک گویند. برخی از سیالات پلاستیک از مدل بینگهام تبعیت می‌کنند.

(معادله ۳)

$\eta_B$  را گرانروی پلاستیک بینگهام ( $Pa \cdot s$ ) و  $\tau_{0B}$  را تنش تسلیم بینگهام ( $Pa$ ) می‌گویند.

$$\sqrt{\tau} = k_{0c} + k_c \sqrt{\dot{\gamma}} \quad (4)$$

مدل کاسون یک مدل بر پایه ساختار ماده غذایی است که برای تعدادی از تعلیق‌های غذایی مورد استفاده قرار گرفته است.

(معادله ۴)

[۹]، مطالعه اثر افزودن هیدروکلوئیدی های کربوکسی متیل سلولز، گوار، سدیم آلژینات بر خواص رئولوژیکی بستنی وانیلی [۱۰] اشاره نمود. در زمینه بررسی رفتار رئولوژیکی آمیخته های بستنی حاوی صمغ دانه بالنگو و شیر انگور، تحقیقات کمی صورت گرفته است. از این جهت، بررسی خواص رئولوژیکی آمیخته های بستنی (حاوی ترکیبات هیدروکلوئیدی و شیر انگور) و مدل سازی شاخص های رئولوژیکی به عنوان تابعی از فرمولاسیون محصول و همچنین تعیین فرمولاسیون بهینه ضروری به نظر می رسد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱ مواد

شیر استریلیزه و هموژنیزه (۳ درصد چربی) خامه پاستوریزه و هموژنیزه (۳۰ درصد چربی)، شیر خشک بدون چربی از شرکت پگاه خراسان، شکر، وانیل، شیر انگور و دانه بالنگو از فروشگاه های محلی شهرستان مشهد و هیدروکلوئید CMC از شرکت سیگما تهیه شد. هیدروکلوئید بالنگو شیرازی به روش امینی (۵) استخراج شد. فرمولاسیون نمونه های مختلف بستنی در جدول ۱، نشان داده شده است.

### ۲-۲ تولید بستنی

پس از تنظیم نسبت ترکیبات در فرمولاسیون نمونه‌های مختلف بستنی، میزان مواد اولیه هر فرمول توزین شد. سپس، شیر، خامه و شیر انگور مخلوط گردید و حرارت داده شدند. پس از رسیدن به دمای ۵۰ درجه سانتی گراد اجزای جامد به آن اضافه و مخلوط گردید و در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۵ ثانیه پاستوریزه شد، پس از اتمام این مرحله مخلوط فوراً به حمام آب و یخ انتقال داده شد تا به دمای ۴ درجه سانتی گراد برسد. سپس مخلوط به مدت ۱۸ ساعت جهت رسانیدن به یخچال انتقال داده شد. پس از مرحله رسانیدن مخلوط، در یک دستگاه بستنی ساز خانگی مرحله انجماد را سپری نمود.

### ۲-۳ آزمون رئولوژیکی مستقل از زمان

اثر سرعت برشی بر رفتار رئولوژیکی نمونه های بستنی توسط ویسکومتر بروکفیلد (Cone and plate) در سطح دمایی ۵ درجه سانتی گراد و در محدوده سرعت چرخشی ۵ تا ۳۰۰ دور بر دقیقه اندازه گیری گردید از آنجایی که نمونه

1. Power Law
2. Herschel-Bulckly
3. Yield Stress
4. Bingham
5. Casson

گردید. پس از دوره آموزش مقدماتی هر کدام از صفات مورد بررسی در این پژوهش (شدت سردی، سفتی، شنی بودن و پذیرش کلی) با توجه به تعاریف ارائه شده [۱۲] به وسیله داوران مورد ارزیابی قرار گرفت. نمونه ها به صورت تصادفی کد گذاری شد. در این آزمون هر کدام از داور ها به صفت مورد بررسی در یک مقیاس خطی به طول ۱۰ سانتی متر از صفر تا ۱۰ امتیاز دادند.

## ۴- نتایج و بحث

### ۴-۱- بررسی رفتار جریان نمونه های بستنی

منحنی تغییرات گرانیوی به عنوان تابعی از سرعت برشی برای نمونه های بستنی به ترتیب حاوی ۲/۵٪، ۵٪، ۷/۵٪، ۱۰٪ (w/w) درصد چربی در غلظت ثابت ۰/۷٪ صمغ کربوکسی متیل سلولز در شکل ۱، نشان داده شده است. همانطور که در شکل قابل مشاهده است، نمونه های بستنی رفتار غیر نیوتونی و شل شونده با برش را از خود نشان داده اند به طوری که با افزایش سرعت چرخشی گرانیوی ظاهری محلول ها کاهش یافته است. این کاهش گرانیوی در درجه برش های پایین شدیدتر و با افزایش درجه برش کاهش می یافت به طوری که در درجه برش های بالا به مقدار گرانیوی ثابتی می رسید. همانگونه که انتظار می رفت با کاهش درصد چربی میزان گرانیوی نمونه های بستنی کاهش یافته است. رفتار شل شونده با برش برای نمونه های بستنی حاوی صمغ دانه بالنگو و کربوکسی متیل سلولز را می توان با ساختار ساختمان فضایی زنجیره ای نیمه سخت این هیدروکلوئید ها و همچنین به وجود ساختار ژل مانند ضعیف آن توضیح داد که باعث افزایش درگیری ماکرومولکولی محلول می گردد [۱۳]. این رفتار برای بیشتر نمونه های کمپلکس غذایی قابل مشاهده است که ناشی از ساختار پلیمری و وزن مولکولی بالای آنها است [۱۴]. رفتار شل شونده با برش برای مواد غذایی دیگر از قبیل، آمیخته بستنی حاوی صمغ کربوکسی متیل سلولز، گوار، آلژینات، زانتان (۱۰)، آمیخته های بستنی حاوی فیبر [۹] کمره پسته ای [۱۵]، مخلوط خمیر کنجد و شیر انگور [۱۶] مشاهده شده است.

$K_{0c}$  عرض از مبدا نمودار  $\tau - \gamma^{0.5}$  و  $k_c$  شیب نمودار فوق است.  $\mu_c = k_c^2$  و  $\tau_{0c} = k_c^2$  به ترتیب عبارتند از گرانیوی کاسون (Pa.s) و تنش تسلیم کاسون (Pa) [۱۱].

### ۲-۴- طرح آماری

برای بررسی اثر ترکیبات فرمولاسیون بر خصوصیات رئولوژیکی از از طرح آماری D-optimal (جدول ۱) و بسط درجه دوم تیلور (معادله ۶) استفاده گردید. در این پژوهش تاثیر چربی در چهار سطح (۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد)، شیره انگور در سه سطح (۰، ۹ و ۱۸ درصد) و دو نوع هیدرو کلوئید (کربوکسی متیل سلولز و بالنگو) هر کدام در چهار سطح (۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ درصد) با استفاده از روش سطح پاسخ بر خصوصیات جریان بستنی مورد آزمون قرار گرفت. برای برآزش داده های رئولوژیکی بر مدل های توان، بینگهام، کاسون پلاستیک، هرشل بالکلی از نرم افزار Matlab 2010 استفاده شد، همچنین نمودارها توسط نرم افزار Excel رسم شدند. به منظور بررسی کارایی مدل از شاخص های مانند ضریب تبیین، ریشه مجموع میانگین خطا<sup>۶</sup> (معادله ۷) استفاده گردید. ضریب تبیین بین صفر و یک بوده و هرچه به یک نزدیک تر باشد نشانه همبستگی بالاتر بین مقادیر پیش بینی شده و مقادیر عددی حاصل از آزمایش است. از اینرو مدلهایی که بیشترین میزان ضریب تبیین و کمترین مقدار RMSE را نشان دهند به عنوان مدل مناسب انتخاب شدند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (R_{model,i} - R_{exp,i})^2}{N}} \quad (7)$$

### ۲-۵- ارزیابی حسی

ارزیابی حسی از نمونه های نگهداری شده در دمای ۱۸- درجه سانتی گراد بعد از یک روز در گروه علوم صنایع غذایی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. داوران چشایی (۲۳ تا ۲۷ سال) از میان دانشجویان رشته علوم صنایع غذایی انتخاب

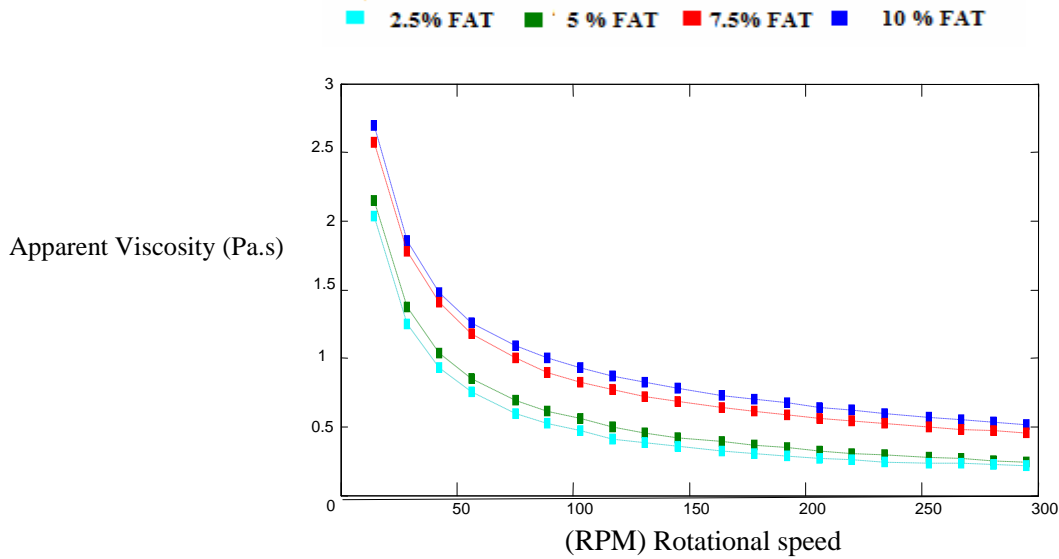
6. Root mean square error

جدول ۱ مقادیر ترکیبات تشکیل دهنده بستنی

| خامه | شیر   | شکر   | شیره | صمغ | امولسیفایر | وانیل | شیرخشک بدون چربی | نوع صمغ | چربی |
|------|-------|-------|------|-----|------------|-------|------------------|---------|------|
| ۱    | ۱/۴   | ۷۶/۷  | ۰    | ۱۸  | ۰/۷        | ۰/۱   | ۰/۱              | CMC     | ۲/۵  |
| ۲    | ۲۰/۲۵ | ۵۷/۸۵ | ۹    | ۹   | ۰/۷        | ۰/۱   | ۰/۱              | بالنگو  | ۱۰   |
| ۳    | ۱/۴   | ۷۷/۱  | ۹    | ۹   | ۰/۳        | ۰/۱   | ۰/۱              | CMC     | ۲/۵  |
| ۴    | ۲۰/۳۵ | ۵۸/۱۵ | ۹    | ۹   | ۰/۳        | ۰/۱   | ۰/۱              | CMC     | ۱۰   |
| ۵    | ۵/۸۳  | ۷۲/۸۷ | ۰    | ۱۸  | ۰/۱        | ۰/۱   | ۰/۱              | CMC     | ۵    |
| ۶    | ۲۰/۳  | ۵۸    | ۰    | ۱۸  | ۰/۵        | ۰/۱   | ۰/۱              | بالنگو  | ۱۰   |
| ۷    | ۲۰/۴  | ۵۸/۳  | ۰    | ۱۸  | ۰/۱        | ۰/۱   | ۰/۱              | بالنگو  | ۱۰   |
| ۸    | ۱/۴   | ۷۶/۷  | ۰    | ۱۸  | ۰/۷        | ۰/۱   | ۰/۱              | CMC     | ۲/۵  |
| ۹    | ۱۳/۱۱ | ۶۵/۵۹ | ۹    | ۹   | ۰/۱        | ۰/۱   | ۰/۱              | CMC     | ۷/۵  |
| ۱۰   | ۱۳/۱۱ | ۶۵/۵۹ | ۹    | ۹   | ۰/۱        | ۰/۱   | ۰/۱              | بالنگو  | ۷/۵  |
| ۱۱   | ۱۳    | ۶۵/۱  | ۰    | ۱۸  | ۰/۷        | ۰/۱   | ۰/۱              | CMC     | ۷/۵  |
| ۱۲   | ۵/۸   | ۷۲/۵  | ۱۸   | ۰   | ۰/۵        | ۰/۱   | ۰/۱              | بالنگو  | ۵    |
| ۱۳   | ۱۳/۱  | ۶۵/۴  | ۰    | ۱۸  | ۰/۳        | ۰/۱   | ۰/۱              | CMC     | ۷/۵  |
| ۱۴   | ۱/۴   | ۷۷/۱  | ۹    | ۹   | ۰/۳        | ۰/۱   | ۰/۱              | CMC     | ۲/۵  |
| ۱۵   | ۵/۷۸  | ۷۲/۳۲ | ۹    | ۹   | ۰/۷        | ۰/۱   | ۰/۱              | CMC     | ۵    |
| ۱۶   | ۲۰/۲۵ | ۵۷/۸۵ | ۰    | ۱۸  | ۰/۷        | ۰/۱   | ۰/۱              | CMC     | ۱۰   |
| ۱۷   | ۲۰/۳۵ | ۵۸/۱۵ | ۹    | ۹   | ۰/۳        | ۰/۱   | ۰/۱              | CMC     | ۱۰   |
| ۱۸   | ۱/۴   | ۷۶/۹  | ۰    | ۱۸  | ۰/۵        | ۰/۱   | ۰/۱              | بالنگو  | ۲/۵  |
| ۱۹   | ۵/۸۳  | ۷۲/۸۷ | ۰    | ۱۸  | ۰/۱        | ۰/۱   | ۰/۱              | بالنگو  | ۵    |
| ۲۰   | ۵/۸۳  | ۷۲/۸۷ | ۰    | ۱۸  | ۰/۱        | ۰/۱   | ۰/۱              | CMC     | ۵    |
| ۲۱   | ۵/۷۸  | ۷۲/۳۲ | ۰    | ۱۸  | ۰/۷        | ۰/۱   | ۰/۱              | بالنگو  | ۵    |
| ۲۲   | ۲۰/۴  | ۵۸/۳  | ۰    | ۱۸  | ۰/۱        | ۰/۱   | ۰/۱              | CMC     | ۱۰   |
| ۲۳   | ۱/۴   | ۷۷/۳  | ۰    | ۱۸  | ۰/۱        | ۰/۱   | ۰/۱              | CMC     | ۲/۵  |
| ۲۴   | ۵/۷۸  | ۷۲/۳۲ | ۰    | ۱۸  | ۰/۱        | ۰/۱   | ۰/۱              | CMC     | ۱۰   |

بررسی رفتار رئولوژیکی مستقل از زمان نمونه های بستنی از چهار مدل توان، بینگهام پلاستیک، هرشل بالکلی و بینگهام استفاده گردید. بر اساس جدول ۲، نتایج نشان داد که مدل توان کارایی بالایی ( $R^2 \geq 0.99$ ) در توصیف رفتار رئولوژیکی نمونه ها بستنی دارد. لذا برای بررسی اثر ترکیبات فرمولاسیون بر خواص رئولوژیکی (شاخص رفتار جریان و ضریب قوام) نمونه های بستنی از این مدل استفاده گردید.

مدل قانون توان کاربرد بسیاری در مطالعه رئولوژی مواد غذایی دارد و بسیاری از تحقیقات انجام گرفته بر روی هیدروکلوئیدهای غذایی از قبیل موسیلاژهای دانه قدومه شیرازی [۱۷]، پلی ساکاریدهای جلبکهای قهوه‌ای [۱۸]، صمغ لوبیای افاقیا (۱۹)، صمغ برگ مونی<sup>۷</sup> [۲۰] و ثعلب [۲۱] قابلیت بالای این مدل را در توصیف رفتار رئولوژیکی محلول این هیدروکلوئیدها نشان داده است. در این پژوهش برای



شکل ۱ گرانروی نمونه های بستنی حاوی صمغ حاوی صمغ ۰/۵ درصد کربوکسی متیل سلولوز در غلظت ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱۰ درصد چربی به عنوان تابعی از سرعت چرخشی در دمای ثابت ۵ درجه سانتی گراد

جدول ۲ پارامترهای رئولوژیکی مدل قانون توان برای نمونه های بستنی حاوی صمغ و شیره انگور

| کد نمونه | $k$ (pa.s <sup>n</sup> ) | $n$ (-) | $R^2$  | RMSE   |
|----------|--------------------------|---------|--------|--------|
| ۱        | ۱۱/۴۹                    | ۰/۴۵۷۵  | ۰/۹۹۰۵ | ۰/۱۱۳  |
| ۲        | ۸/۲۷۷                    | ۰/۵۳۷   | ۰/۹۹۲۳ | ۰/۲۱۵  |
| ۳        | ۱/۴۳۴                    | ۰/۵۹۸۸  | ۰/۹۹۹۰ | ۰/۳۱۳  |
| ۴        | ۰/۶۰۱۹                   | ۰/۵۷۷   | ۰/۹۹۵۹ | ۰/۲۵۷۴ |
| ۵        | ۰/۰۹۵۷                   | ۰/۷۹۸۹  | ۰/۹۹۷۲ | ۰/۱۳۳۷ |
| ۶        | ۱/۱۵۴                    | ۰/۵۵۹۹  | ۰/۹۹۹۱ | ۰/۲۱۲۴ |
| ۷        | ۰/۲۹۳۲                   | ۰/۵۷۳۷  | ۰/۹۹۵۲ | ۰/۱۳۴۳ |
| ۸        | ۱۳/۲۶                    | ۰/۴۰۱۲  | ۰/۹۹۴۸ | ۰/۹۴   |
| ۹        | ۰/۱۵۰۹                   | ۰/۶۹۰۸  | ۰/۹۹۰۸ | ۰/۱۹۳۲ |
| ۱۰       | ۰/۴۴۲۱                   | ۰/۴۲۰۲  | ۰/۹۹۳۸ | ۰/۸۴۸  |
| ۱۱       | ۱۶/۲۵                    | ۰/۲۶۲۵  | ۰/۹۹۳۶ | ۰/۹۳۱۴ |
| ۱۲       | ۱/۸۹                     | ۰/۷۱۸۳  | ۰/۹۹۲۱ | ۰/۶۵۴  |
| ۱۳       | ۱/۰۳۹                    | ۰/۵۰۰۹  | ۰/۹۹۲۸ | ۰/۳۵۵۶ |
| ۱۴       | ۰/۵۳۵۶                   | ۰/۶۵۴۵  | ۰/۹۹۷۹ | ۰/۸۱۰۸ |
| ۱۵       | ۱۱/۹۲                    | ۰/۴۲۶۳  | ۰/۹۹۹۵ | ۰/۶۰۷۳ |
| ۱۶       | ۱۵/۵۴                    | ۰/۲۴۲۱  | ۰/۹۹۵۳ | ۱/۰۱۴  |
| ۱۷       | ۰/۲۸۷۴                   | ۰/۶۹۸۶  | ۰/۹۹۴۳ | ۰/۲۸۶۲ |
| ۱۸       | ۱۰/۹۵                    | ۰/۲۶۵۸  | ۰/۹۹۸۰ | ۰/۷۳۵  |
| ۱۹       | ۰/۲۳۵۶                   | ۰/۶۳۷۲  | ۰/۹۹۸۷ | ۰/۲۶۷  |
| ۲۰       | ۰/۱۱۹                    | ۰/۶۴۵۹  | ۰/۹۹۰۸ | ۰/۱۶۷  |
| ۲۱       | ۸/۲۵۴                    | ۰/۴۸۶۳  | ۰/۹۹۶۷ | ۰/۴۲۸  |
| ۲۲       | ۰/۰۶۴۰                   | ۰/۷۴۳۵  | ۰/۹۹۹۳ | ۰/۳۳۷۰ |
| ۲۳       | ۰/۴۶۹۵                   | ۰/۴۹۴۶  | ۰/۹۹۰۱ | ۰/۲۰۵۵ |
| ۲۴       | ۰/۰۸۲۸                   | ۰/۷۰۱۹  | ۰/۹۹۸۴ | ۰/۱۴۰۲ |

## ۴-۲- مدل توان

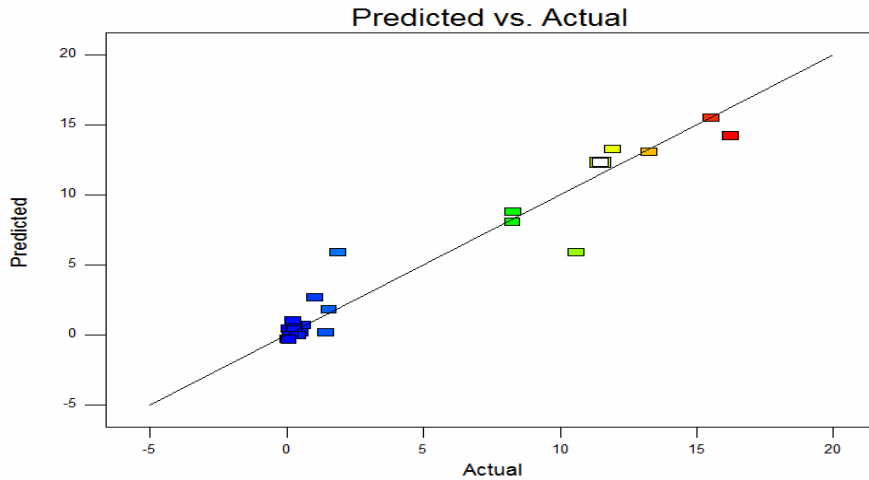
از آنجایی که پارامترهای رئولوژیکی مدل توان (ضریب قوام  $k$  و شاخص رفتاری جریان  $n$ ) نمایش مناسبی از رفتار جریان نمونه های بستنی نشان می دهند از این مدل برای بررسی اثر ترکیبات فرمولاسیون بر خصوصیات رئولوژیکی استفاده شده است. برای مدل سازی ضریب قوام از بسط درجه دوم تیلور استفاده گردید (جدول ۳). نتایج نشان داد که بسط درجه دوم تیلور همبستگی مناسبی برای برازش داده های ضریب قوام از خود نشان می دهد ( $R^2=0.94$ ). یکی دیگر از شاخص های کارایی مدل های رگرسیونی میزان  $Q$ -squared می باشد.  $Q$ -squared نشان می دهد که مدل چقدر می تواند پاسخ ها را برای شرایط آزمایشی جدید پیشگویی کند. مقادیر بزرگتر از ۰/۷، نشان می دهد که مدل دارای توان برآورد خوبی است و دارای خطا برآورد کمی می باشد. میزان  $Q$ -squared در این پژوهش ۰/۸۹ به دست آمده که همان طور که اشاره شد نشان دهنده توانایی بالای مدل برای برآورد پاسخ ها در شرایط جدید آزمایشی می باشد [۲۱]. بر اساس جدول ۳ متغیرهای درصد صمغ، نوع صمغ، اثر درجه دوم درصد صمغ بر ضریب

قوام نمونه های بستنی به طور معنی دار ( $P_{value} \leq 0.05$ ) موثر می باشند. بررسی داده های حاصل از آزمایش نمونه های بستنی حاوی صمغ دانه بالنگو و CMC در چهار غلظت مختلف (۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ درصد) نشان داد که مقادیر ضریب قوام به غلظت محلول بستگی داشته و با افزایش آن مقدار ضریب قوام بیشتر می شد (شکل ۳). مقدار ضریب قوام که نشان دهنده ویسکوزیته سیال است برای غلظت های ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۷٪ صمغ CMC به ترتیب برابر ۰/۱۷۴۲، ۰/۸۶۴ و ۶/۲۶۵ ( $Pa \cdot s^n$ ) و همچنین برای غلظت های ۰/۱، ۰/۵ و ۰/۷٪ به ترتیب برابر ۸/۲۶۵، ۴/۶۴۳ و ۰/۳۳۸۸ ( $Pa \cdot s^n$ ) می باشد. سون افزایش گرانیوی و شاخص  $k$  به واسطه افزایش غلظت را ناشی از افزایش بر هم کنش ها و درگیرهای بین مولکولی دانستند [۲۳].

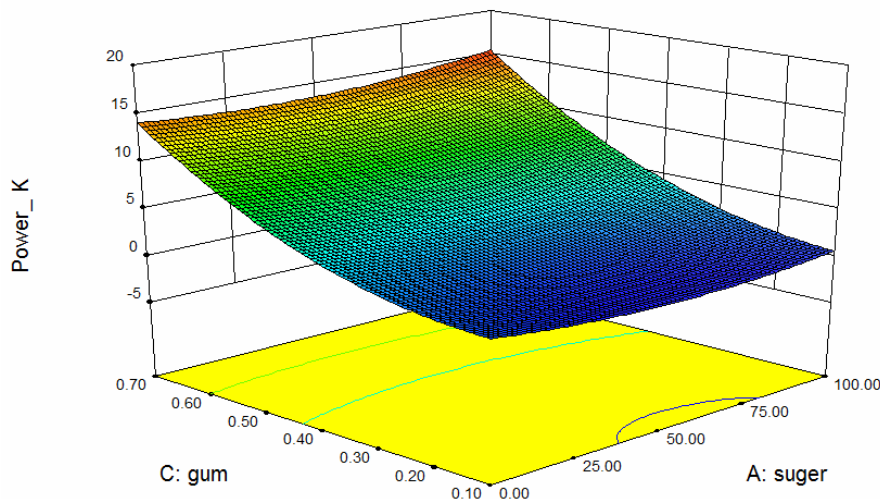
در مورد اثر شیره انگور (شکل ۳) بر میزان ضریب قوام نمونه های بستنی می توان این گونه توضیح داد که با افزایش درصد شیره انگور و کاهش شکر در یک درصد چربی ثابت (۶/۲۵) ضریب قوام کاهش یافته، اما میزان تغییرات در این حالت معنی دار ( $P < 0.05$ ) نبوده است.

جدول ۳- جدول آنالیز واریانس عوامل موثر بر ضریب قوام نمونه های بستنی و ضرایب مدل رگرسیونی

| منبع           | ضرایب مدل | درجه آزادی | مجموع مربعات | اندیس F | اندیس P       |
|----------------|-----------|------------|--------------|---------|---------------|
| Model          | ۲/۶۱۱     | ۱۳         | ۷۰۵/۶۱۰      | ۱۰/۶۵۸  | ۰/۰۰۰۳۴۷      |
| A-sug          | ۰/۸۵۱۳    | ۱          | ۸/۸۲۰        | ۱/۷۳۲   | ۰/۲۱۷         |
| B-fat          | ۰/۳۵۰۶    | ۱          | ۰/۸۴۵        | ۰/۱۶۵۹  | ۰/۶۹۲۳        |
| C-gum          | ۵/۷۳۶     | ۱          | ۴۳۱/۴۸۴      | ۸۴/۷۲۷  | $\leq 0.0001$ |
| D-D            | -۱/۰۲     | ۱          | ۱۸/۳۸۹       | ۳/۱۹۸   | ۰/۰۴۳         |
| AB             | ۰/۳۷۱۳    | ۱          | ۰/۷۰۳۳       | ۰/۱۳۸۱  | ۰/۷۱۷۹        |
| AC             | ۰/۵۰۰     | ۱          | ۲/۷۷۹        | ۰/۵۴۵۸  | ۰/۴۷۷۰        |
| AD             | ۰/۶۷۳     | ۱          | ۵/۳۴۹        | ۱/۰۵۴۰  | ۰/۳۲۹۵        |
| BC             | ۰/۴۸۵     | ۱          | ۱/۹۹۸        | ۰/۳۹۲۵  | ۰/۵۴۵         |
| BD             | -۰/۰۸۳    | ۱          | ۰/۰۴۶۱       | ۰/۰۰۹۰  | ۰/۹۲۶۰        |
| CD             | -۱/۲۰۲    | ۱          | ۱۶/۲۹۱       | ۳/۱۹۸۹  | ۰/۱۰۳۹        |
| A <sup>2</sup> | ۱/۱۳۸     | ۱          | ۴/۶۹۸۹       | ۰/۹۲۲۷  | ۰/۳۵۹۴        |
| B <sup>2</sup> | -۱/۲۳۸    | ۱          | ۵/۸۳۹۲       | ۱/۱۴۶۶  | ۰/۳۰۹۴        |
| C <sup>2</sup> | ۳/۱۱۹     | ۱          | ۲۸/۴۶۷۵      | ۵/۵۸۹   | ۰/۰۳۹۶        |
| Residual       |           | ۱۰         | ۵/۰۹۶۲       | ۰/۳۲۸۶  |               |
| Lack of Fit    |           | ۵          | ۲/۵۱۷        |         |               |
| Pure Error     |           | ۵          | ۷/۶۶۸        |         | ۰/۸۷۷۵        |
| Cor Total      |           | ۲۳         |              |         |               |
| RMSE           | ۲/۲۴۱     |            |              |         |               |



شکل ۲ همبستگی بین نتایج حاصل از مدل و داده های تجربی حاصل از ضریب قوام نمونه های بستنی ( $R^2=0.94$ ).



شکل ۳ نمودار سطح پاسخ تاثیر تغییرات غلظت صمغ و درصد شکر بر ثابت ضریب قوام نمونه های بستنی در میزان ثابت چربی ۶/۵٪.

دهند. بررسی داده های حاصل از آزمایش نمونه های بستنی حاوی صمغ دانه بالنگو و CMC در چهار غلظت مختلف (۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، و ۰/۷ درصد) نشان داد که مقادیر شاخص رفتار جریان به غلظت محلول بستگی داشته و با افزایش آن مقدار شاخص رفتار جریان کاهش می یابد (شکل ۵). علت کاهش شاخص رفتار جریان با افزایش غلظت را می توان به افزایش درگیری بین مولکولی نسبت داد که سبب توسعه رفتار شل شوندگی با برش می شود [۲۴]. شاخص رفتار جریان ( $n$ ) برای تمامی غلظت ها پایین تر از عدد یک بود. کمترین مقدار شاخص رفتار جریان برای نمونه های بستنی حاوی صمغ دانه بالنگو در غلظت ۰/۷٪ مشاهده شد که برابر ۰/۳۴ بود. بیشترین مقدار هم برای نمونه های بستنی حاوی صمغ CMC در غلظت ۰/۱٪ (۰/۶۳۳۴) مشاهده شد. هرچه مقدار  $n$  به یک

برای مدل سازی شاخص جریان از مدل رگرسیون خطی استفاده گردید. مدل رگرسیونی خطی همبستگی مناسبی با داده های شاخص رفتار جریان از خود نشان می دهد (شکل ۴). یکی دیگر از شاخص های کارایی مدل های رگرسیونی آزمون کفایت دقت<sup>۸</sup> می باشد. این شاخص دامنه خروجی مدل در نقاط آزمایشی را با میانگین خطای پیش بینی شده توسط مدل مقایسه می کند. برای یک مدل با دقت بالا مقدار شاخص مذکور حداقل باید ۴ باشد. در این پژوهش میزان پارامتر کفایت دقت ۱۰/۱۴ بدست آمد، که نشان دهنده مناسب بودن مدل برای فضای آزمایشی به کار برده می باشد [۲۴]. بر اساس نتایج حاصل از جدول (۴) متغیرهای درصد صمغ و درصد چربی اثر معنی داری بر شاخص رفتار جریان از خود نشان می

8. Adequacy precision

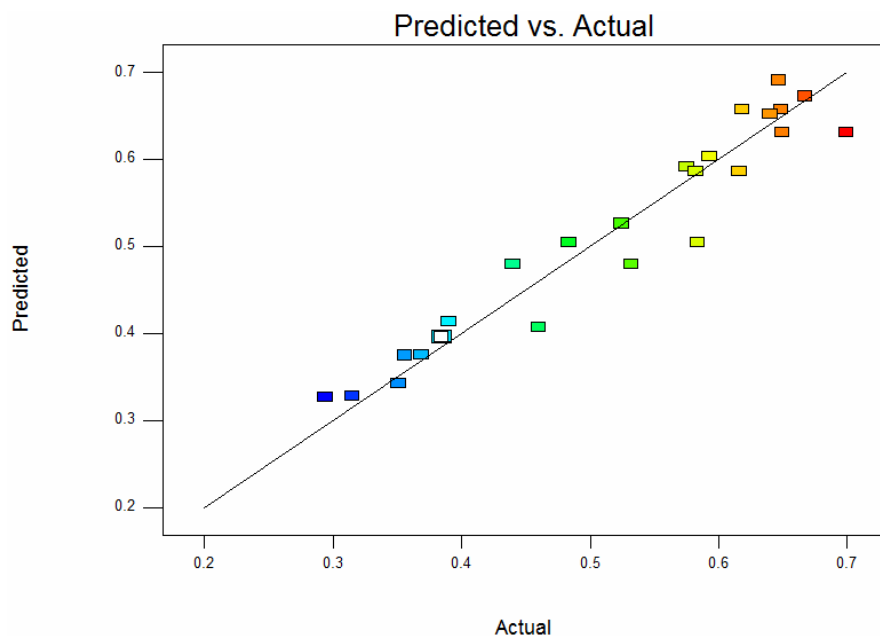


افزایش درصد شکر و کاهش شیره انگور در یک درصد چربی و غلظت صمغ ثابت (۶/۲۵،۰/۴) شاخص رفتار جریان افزایش یافته، اما میزان تغییرات در این حالت معنی دار ( $p < ۰/۰۵$ ) نبوده است.

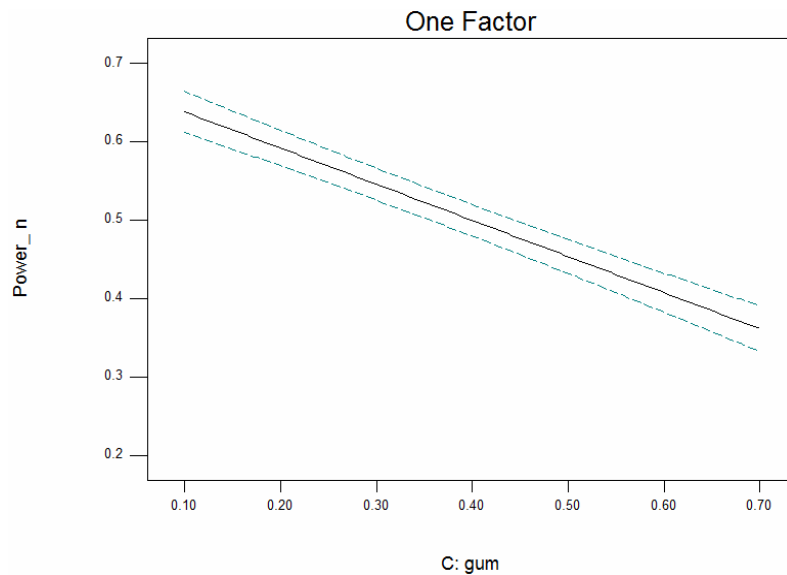
نزدیکتر شود، نشان دهنده نزدیک شدن به رفتار نیوتونی و کاهش رفتار سودویلاستسیته است نمونه های بستنی با مقدار  $n$  پایین تر و گرانروی بالاتر، خاصیت خوشایند دهانی بیشتری دارند [۲۶]. همچنین در مورد اثر شیره انگور (شکل ۶) بر میزان  $n$  نمونه های بستنی می توان این گونه توضیح داد که با

جدول ۴ آنالیز واریانس عوامل موثر بر ضریب شاخص رفتار جریان نمونه های بستنی و ضرایب مدل رگرسیونی

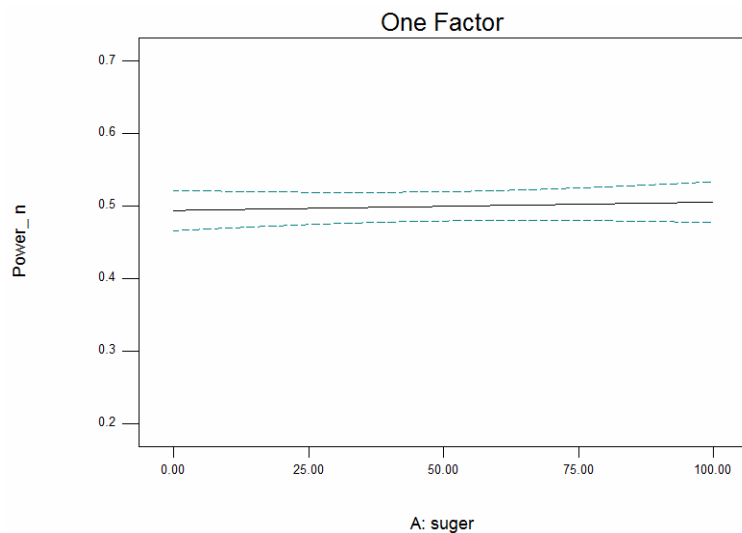
| منبع        | ضرایب مدل | درجه آزادی | مجموع مربعات | اندیس F | اندیس P       |
|-------------|-----------|------------|--------------|---------|---------------|
| Model       | ۰/۵       | ۴          | ۰/۳۴         | ۶۲/۷۶   | ۰/۰۰۰۱        |
| A-suger     | ۵/۸۲ E-۳  | ۱          | ۵/۳۱۴ E-۳    | ۰/۳۹    | ۰/۵۴۰۱        |
| B-fat       | ۰/۰۴۱     | ۱          | ۰/۰۲۳        | ۱۶/۸۹   | ۰/۰۰۰۶        |
| C-gum       | ۰/۱۴      | ۱          | ۰/۳۲         | ۲۲۹/۹۶  | $\leq ۰/۰۰۰۱$ |
| D-D         | ۳/۶۳ E-۳  | ۱          | ۲/۵۴ E-۴     | ۰/۱۹    | ۰/۶۴۸         |
| Residual    |           | ۱۹         | ۰/۰۲۶        |         |               |
| Lack of Fit |           | ۱۴         | ۰/۰۱۵        | ۰/۴۵    | ۰/۸۹۰۰        |
| Pure Error  |           | ۵          | ۰/۰۱۲        |         |               |
| Cor         |           | ۲۳         | ۰/۳۷         |         |               |
| Total RMSE  | ۱/۳۳      |            |              |         |               |



شکل ۴ همبستگی بین نتایج حاصل از مدل و داده های تجربی حاصل از شاخص رفتار جریان نمونه های بستنی ( $R^2 = ۰/۹۲$ ).



شکل ۵ تاثیر تغییرات غلظت صمغ بر شاخص رفتار جریان نمونه های بستنی در میزان ثابت چربی و شکر (۶/۵، ۵۰ درصد)



شکل ۶ تاثیر تغییرات غلظت شکر بر شاخص رفتار جریان نمونه های بستنی در میزان ثابت چربی و صمغ (۶/۵، ۰/۴ درصد)

بالای مدل های مذکور می باشد، برای انتخاب مدل مناسب از دو شاخص  $RMSE$  و ضریب تبیین استفاده شد. نتایج نشان داد که هر دو مدل همبستگی بالایی ( $R^2 \geq 0.90$ ) را با داده های رئولوژیکی نشان می دهند اما داده های حاصل از مدل کاسون با داده های تجربی همبستگی بیشتری را نشان دادند (بالاترین میزان ضریب همبستگی و کمترین مقدار  $RMSE$  میانگین، نسبت به سایر مدل ها). نتایج نشان داد که مدل کاسون کارایی بالایی ( $R^2 \geq 0.96$ ) در توصیف رفتار رئولوژیکی نمونه ها بستنی دارد لذا برای بررسی اثر ترکیبات فرمولاسیون بر تنش تسلیم نمونه های بستنی از این مدل استفاده گردید.

#### ۴-۳- تنش تسلیم

به منظور پیدا کردن مقدار تنش تسلیم مدل های رئولوژیکی هرشل بالکلی، بینگهام پلاستیک، کاسون مورد مطالعه قرار گرفت (جدول ۵). نتایج نشان دهنده عدم معنی داری مدل هرشل بالکلی برای برازش داده های رئولوژیکی حاصل از نمونه ها بستنی می باشد. دلیل این امر را می توان منفی بودن تنش تسلیم به دست آمده از مدل هرشل بالکلی دانست چیزی که از نظر فیزیکی غیر ممکن می باشد. اما برازش داده ها به وسیله مدل بینگهام پلاستیک و کاسون نشان دهنده قابلیت

جدول ۵ پارامتر تنش تسلیم مدل بینگهام پلاستیک و کاسون برای نمونه های بستنی حاوی صمغ و شیره انگور

| کاسون  |        |               | بینگهام |        |               | کد نمونه |
|--------|--------|---------------|---------|--------|---------------|----------|
| $R^2$  | RMSE   | $\tau_0$ (pa) | $R^2$   | RMSE   | $\tau_0$ (pa) |          |
| ۰/۹۸۵۹ | ۰/۲۱۶۴ | ۲۵/۶۴۴        | ۰/۹۵۸۸  | ۰/۳۸۳۴ | ۵۰/۴۶         | ۱        |
| ۰/۹۶۷۲ | ۰/۳۹۷۸ | ۱۷/۵۱         | ۰/۹۵۲۱  | ۰/۲۸۱۵ | ۴۴/۵۵         | ۲        |
| ۰/۹۹۲۲ | ۰/۱۰۲  | ۳/۳۹          | ۰/۹۸۱۸  | ۵/۶۸۱  | ۹/۰۷۹         | ۳        |
| ۰/۹۹۷۸ | ۰/۳۰۹۳ | ۱/۵۸          | ۰/۹۹۰۱  | ۲/۳۰۱  | ۳/۶۷۸         | ۴        |
| ۰/۹۹۸۲ | ۰/۰۲۴۸ | ۰/۲۳۵         | ۰/۹۹۹۳  | ۰/۴۹۶۷ | ۰/۸۶۹۴        | ۵        |
| ۰/۹۹   | ۰/۰۸۸۷ | ۲/۷۰۶         | ۰/۹۷۷۸  | ۲/۹۷   | ۶/۶۵۵         | ۶        |
| ۰/۹۸۳۹ | ۰/۰۵۹۱ | ۰/۶۷۴         | ۰/۹۷۲۲  | ۰/۴۷۲۹ | ۱/۷۴۴         | ۷        |
| ۰/۹۷   | ۰/۲۵۵۵ | ۲۷/۵۲         | ۰/۹۳۲   | ۰/۰۶۱۹ | ۴۹/۴۹         | ۸        |
| ۰/۹۹۳۷ | ۰/۰۴۶۰ | ۰/۴۰۲۸        | ۰/۹۹۷۱  | ۳/۵۶۳  | ۱/۱۹          | ۹        |
| ۰/۹۳۵۳ | ۰/۰۸۲  | ۰/۸۶۴         | ۰/۹۰۰۱  | ۰/۰۸۷  | ۱/۷۳۷         | ۱۰       |
| ۰/۹۴۸۷ | ۰/۱۸۸۷ | ۲۸/۴۶         | ۰/۸۹۰۷  | ۰/۴۵۴  | ۴۰/۱۳         | ۱۱       |
| ۰/۹۶۸۵ | ۰/۱۲۸۷ | ۳/۷۰۸         | ۰/۹۹۳۷  | ۰/۱۳۵۹ | ۱۵/۶          | ۱۲       |
| ۰/۹۹۹۴ | ۰/۰۱۵۵ | ۲/۷۹۸         | ۰/۹۹۱۶  | ۵۰/۴۶  | ۵/۲۰۵         | ۱۳       |
| ۰/۹۸۴۴ | ۰/۱۰۰۲ | ۱/۸۲۵         | ۰/۹۹۷۶  | ۴۴/۵۵  | ۴/۱۳۱         | ۱۴       |
| ۰/۹۸۶۹ | ۰/۱۸۳۲ | ۲۵/۳۱۶        | ۰/۹۶۲۵  | ۹/۰۷۹  | ۴۷/۸۹         | ۱۵       |
| ۰/۹۷۲۷ | ۰/۱۱۳۶ | ۲۵/۱۴۲        | ۰/۹۳۹۶  | ۳/۶۷۸  | ۳۵/۰۳         | ۱۶       |
| ۰/۹۹۱۸ | ۰/۰۶۷۹ | ۰/۶۴۳         | ۰/۹۸۵۲  | ۰/۸۶۴۹ | ۲/۲۱۳         | ۱۷       |
| ۰/۹۲۴۳ | ۰/۱۹۲۸ | ۴/۳۳۸         | ۰/۸۹۶۵  | ۶/۶۵۵  | ۲۶/۸۹         | ۱۸       |
| ۰/۹۸۳۹ | ۰/۰۷۰۱ | ۰/۵۰۹۱        | ۰/۹۶۷۳  | ۱/۷۴۴  | ۱/۶۰۱         | ۱۹       |
| ۰/۹۸۸۹ | ۰/۰۳۷۶ | ۰/۳۹۵         | ۰/۹۹۷۴  | ۴۹/۴۹  | ۰/۸۹۳۹        | ۲۰       |
| ۰/۹۸۳۴ | ۰/۲۱۰۷ | ۲۲/۲۱         | ۰/۹۸۶۱  | ۱/۱۹   | ۳۹/۹۲         | ۲۱       |
| ۰/۹۹۸۵ | ۰/۰۱۵۶ | ۰/۱۳۲۹        | ۰/۹۹۴۹  | ۱/۷۳۷  | ۰/۵۲۷۲        | ۲۲       |
| ۰/۹۶۲۷ | ۰/۰۸۶۹ | ۰/۹۹          | ۰/۹۳۷۹  | ۴۰/۱۳  | ۲/۲۷          | ۲۳       |
| ۰/۹۹۲۹ | ۰/۰۳۴۷ | ۰/۱۵۹         | ۰/۹۸۷۵  | ۱۵/۶   | ۰/۶۸۷         | ۲۴       |

## ۳-۵- مدل کاسون

مدل های رگرسیونی آزمون ضعف برازش<sup>۹</sup> می باشد. این آزمون نشانه ای از ضعف داده های آزمایشی برای یک مدل است که در آن نقاط، مدل نمی تواند خطای تصادفی داده های آزمایشی را محاسبه کند. اگر آزمون ضعف برازش معنی دار باشد پاسخها با احتمال ضعیفی توسط مدل پیش بینی می شود (جدول ۶). نتایج نشان دهنده عدم معنی داری آزمون مذکور برای مدل برازش شده بر تنش تسلیم می باشد. بر اساس جدول (۶)

از آنجایی که مدل کاسون در میان سایر مدل های رئولوژیکی دارای تنش تسلیم، نمایش مناسبی از رفتار جریان نمونه های بستنی را نشان می دهد از این مدل برای بررسی اثر ترکیبات فرمولاسیون بر تنش تسلیم استفاده شد. برای مدل سازی تنش تسلیم از بسط درجه دوم تیلور استفاده گردید (جدول ۶). بر اساس شکل ۷ نتایج نشان داد که بسط درجه دوم تیلور همبستگی مناسبی برای برازش داده های تنش تسلیم از خود نشان می دهد ( $R^2=0/99$ ). یکی دیگر از شاخص های کارایی

همکاران [۲۸] تاثیر معنی دار درصد چربی را بر شدت سردی بستنی کم چرب گزارش نمودند. همچنین در مورد تاثیر صمغ می توان این گونه نتیجه گیری کرد که، افزایش غلظت یک بیو پلی مر که توانایی تشکیل شبکه و گیر انداختن آب را در سیستم دیسپرسیونی ماده غذایی دارد، موجب کاهش میزان آب آزاد گردیده و این عامل باعث کم شدن میزان کریستال های یخ می شود. از آنجا که یخ دارای ضریب هدایت حرارتی  $W/(M.K^{\circ})$  ۲/۳ می باشد و نقش مهمی در انتقال حرارت هدایتی در ماده غذایی دارد، کاهش آن موجب کم شدن میزان سردی شده است.

### ۳-۶-۲- شنی بودن بافت

تاثیر متغیرهای مستقل (صمغ، شکر) بر میزان شنی بودن بافت در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان طور که از نمودار پاسخ مشاهده می شود، میزان شنی بودن بافت تحت تاثیر تغییر سطوح صمغ و شکر به صورت معنی داری تغییر می کند. شنی بودن بافت به میزان زیادی تابع کریستالیزاسیون قند لاکتوز می باشد، این قند دارای دو فرم آنومریک آلفا و بتا می باشد که فرم آلفا حلالیت کمی دارد و در اثر فرایند تغلیظ مانند انجماد به سرعت به صورت کریستال های درشت آلفا مونو هیدراته تبدیل می شود، و این امر عامل اصلی شنی شدن بافت<sup>۱</sup> در بستنی می باشد [۲۹].

اثر صمغ بر میزان شنی بودن را می توان این گونه تفسیر کرد که با افزایش غلظت صمغ ویسکوزیته دیسپرسیون افزایش یافته، فرایند انتقال جرم به روی هسته های کریستال جلوگیری شده است. همچنین در مورد تاثیر سطوح شکر بر روی میزان شنی شدن بافت بستنی می توان به این نکته اشاره کرد که قند ساکاروز خاصیت احیا کنندگی نداشته به همین دلیل در زمان حل شدن فاقد پدیده موتاریتاسیون می باشد، بنابراین در زمان استفاده از این قند در فرمولاسیون بستنی تنوع ایزومریک محلول قندی پایین است که این امر به رشد کریستال ها کمک می کند، اما زمانی که از قند های احیا کننده مثل فروکتوز (شیره انگور) در فرمولاسیون استفاده شده است، به دلیل افزایش تنوع ایزومریک محلول از شدت کریستالیزاسیون لاکتوز کاسته شده است.

متغیرهای درصد صمغ، نوع صمغ، درصد چربی اثر درجه دوم درصد صمغ و اثر برهمکنش غلظت و نوع صمغ بر تنش تسلیم نمونه های بستنی به طور معنی دار ( $P_{value} \leq 0/05$ ) موثر می باشند. همانطور که در شکل (۸) نشان داده شده است، مقادیر تنش تسلیم نمونه های بستنی به غلظت و نوع محلول هیدروکلوئیدی بستگی داشته و با افزایش غلظت بیشتر می شود. مقدار تنش تسلیم برای غلظت های ۰/۱، ۰/۳، و ۰/۷٪ نمونه های بستنی حاوی صمغ CMC به ترتیب برابر ۰/۳۸۵، ۲/۴۷ و ۱۹/۸۲ (Pa) و همچنین برای غلظت های ۰/۱، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۸۲٪ نمونه های حاوی صمغ بالنگو به ترتیب برابر ۰/۳۶۷، ۶/۳۶۷، ۲۱/۲۵۳ (Pa) می باشد. وجود تنش تسلیم برای نمونه های آمیخته بستنی ممکن است به دلیل تعداد زیاد باندهای هیدروژنی در ساختار ماریپیج آن ها باشد که منجر به ایجاد ساختمان فضایی پایداری در آنها گشته که در مقابل جریان مقاومت می کنند [۲۷]، همچنین وجود تنش تسلیم نشان دهنده وجود پیوندهای جانبی و یا ساختارهای تعاملی در ماده است که قبل از جریان ماده در درجه مناسب بایستی شکسته شوند. همچنین در مورد اثر شیره انگور (شکل ۹) بر میزان تنش تسلیم نمونه های بستنی می توان این گونه توضیح داد که با افزایش درصد شکر و کاهش شیره انگور در یک درصد چربی و غلظت صمغ ثابت (۶/۵، ۰/۴) تنش تسلیم کاهش یافته، اما میزان تغییرات در این حالت معنی دار ( $p < 0/05$ ) نبوده است.

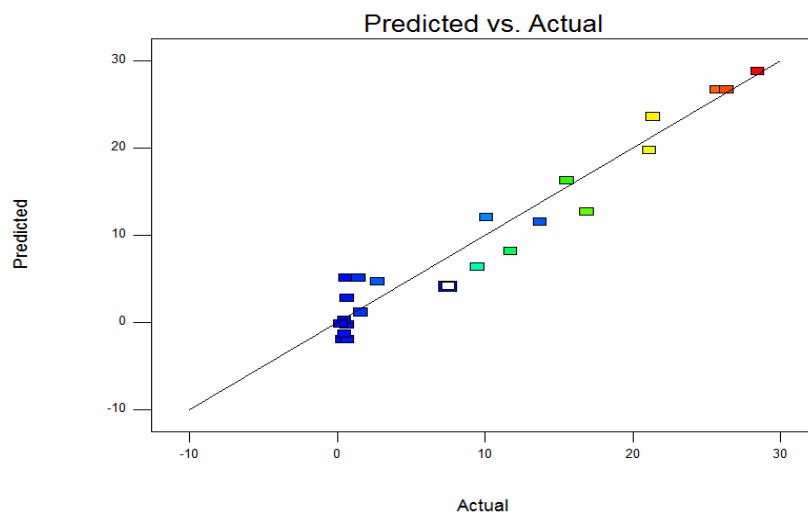
### ۳-۶-۳ نتایج آنالیز حسی

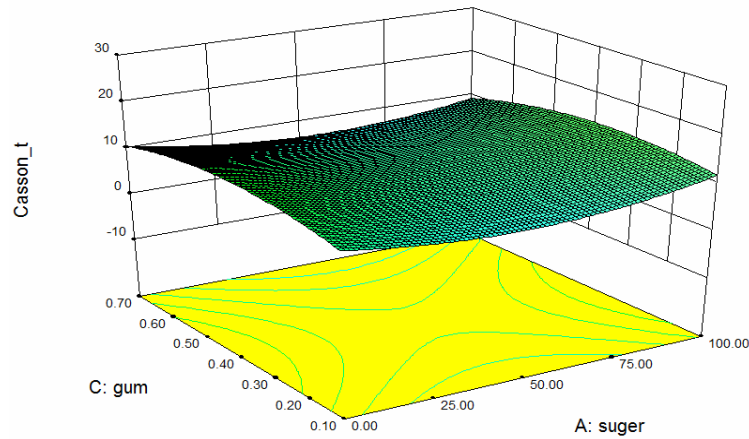
#### ۳-۶-۱- میزان سردی

تاثیر متغیرهای مستقل بر سردی در شکل ۱۰ الف و ب نشان داده شده است. همان طور که از نمودار پاسخ مشاهده می شود، فاکتور مذکور به صورت معنی داری با تغییرات سطوح میزان چربی و همچنین صمغ تغییر یافته است. دلیل چنین پدیده ای را می توان تاثیر این دو عامل بر ضریب هدایت حرارتی محصول دانست. به طور مثال ضریب هدایت حرارتی چربی  $W/(M.K^{\circ})$  ۰/۱۸ می باشد که در مقابل سایر بیو پلی مرها و آب ضریب هدایت حرارتی پایین محسوب می شود. در نتیجه می توان چنین استدلال کرد که چربی به دلیل تاثیر عایقی که دارد موجب کاهش فاکتور سردی شده است. آیم و

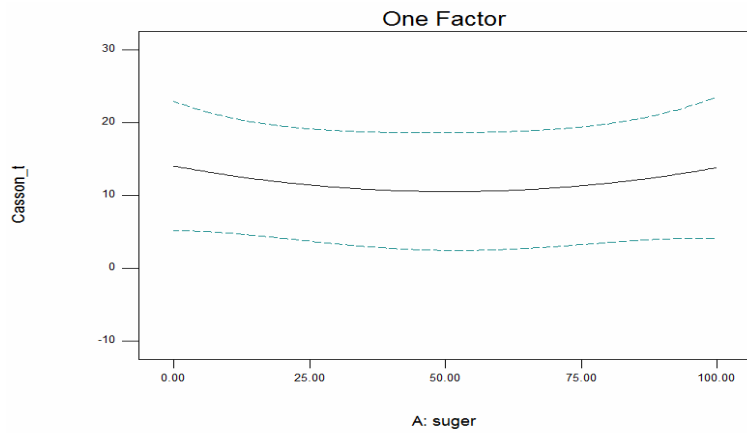
جدول ۶ جدول آنالیز واریانس عوامل موثر بر تنش تسلیم نمونه های بستنی و ضرایب مدل رگرسیونی

| منبع        | ضرایب مدل | درجه آزادی | مجموع مربعات | اندیس F   | اندیس P |
|-------------|-----------|------------|--------------|-----------|---------|
| Model       | ۳/۴۳      | ۱۳         | ۲۷۲۸/۴۴      | ۱۱۴/۴۷    | ۰/۰۰۰۱  |
| raA-sug     | -۰/۷۹     | ۱          | ۷/۵۸         | ۴/۱۳      | ۰/۰۶۹۵  |
| B-fat       | -۱/۲۴     | ۱          | ۱۰/۵۲        | ۵/۷۴      | ۰/۰۳۷۶  |
| C-gum       | ۱۱/۲۹     | ۱          | ۱۶۶۹/۹۲      | ۹۱۰/۷۸    | ≤۰/۰۰۰۱ |
| D-D         | -۲/۱۱     | ۱          | ۷۸/۷۵        | ۴۲/۹۵     | ۰/۰۰۰۸  |
| AB          | -۰/۲۷     | ۱          | ۰/۵۲         | ۰/۲۹      | ۰/۶۰۵۱  |
| AC          | -۰/۱      | ۱          | ۰/۱۲         | ۰/۶۵      | ۰/۸۰۳۵  |
| AD          | -۰/۳۹     | ۱          | ۱/۸          | ۰/۹۸      | ۰/۳۴۵۶  |
| BC          | -۰/۰۱۹    | ۱          | ۳/۱۴ E-۳     | ۱/۷۱۵ E-۳ | ۰/۹۶۷۸  |
| BD          | -۰/۹      | ۱          | ۵/۳۶         | ۲/۹۲      | ۰/۱۱۸   |
| CD          | -۱/۵۴     | ۱          | ۲۶/۶۴        | ۱۴/۵۳     | ۰/۰۰۳۴  |
| A^2         | -۰/۷۴     | ۱          | ۲            | ۱/۰۹      | ۰/۳۲۱۱  |
| B^2         | -۰/۵۵     | ۱          | ۱/۱۶         | ۰/۶۳      | ۰/۴۴۵۳  |
| C^2         | ۹/۰۸      | ۱۰         | ۲۴۱/۰۵       | ۱۳۱/۴۷    | ۰/۰۰۰۱  |
| Residual    |           | ۲۳         |              |           |         |
| Lack of Fit |           | ۰/۴۹۵      |              |           |         |
| Pure Error  |           |            |              |           |         |
| Cor         |           |            |              |           |         |
| Total       |           |            |              |           |         |
| RMSE        |           |            |              |           |         |

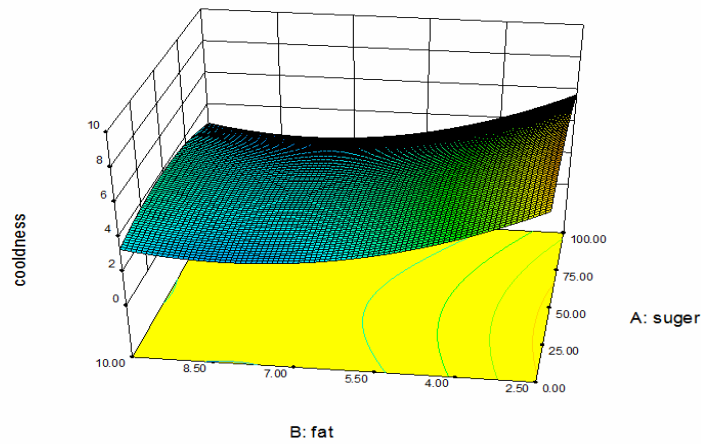
شکل ۷ همبستگی بین نتایج حاصل از مدل و داده های تجربی حاصل از تنش تسلیم نمونه های بستنی ( $R^2 = ۰/۹۹$ ).



شکل ۸ نمودار سطح پاسخ تاثیر تغییرات غلظت صمغ و درصد شکر بر تنش تسلیم نمونه های بستنی در میزان ثابت چربی ۶/۵٪

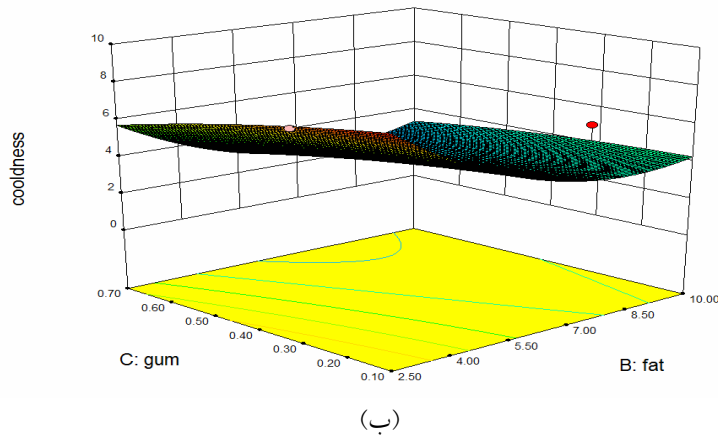


شکل ۹ تاثیر تغییرات غلظت شکر بر تنش تسلیم نمونه های بستنی در میزان ثابت چربی و صمغ (۶/۵، ۰/۴ درصد).



(الف)

شکل ۱۰ اثر چربی و شکر به روی سردی نمونه نوع صمغ CMC در میزان ۰/۴ درصد (الف)



شکل ۱۰ اثر صمغ و چربی به روی سردی نمونه در میزان ثابت ۵۰٪ شکر و نوع صمغ CMC (ب)

که میزان تابع مطلوبیت برای عملیات بهینه سازی ۰/۹۳ می باشد که خود نشان دهنده دقت بالای عملیات بهینه سازی است.

#### ۴- نتیجه گیری

نمونه های بستنی تهیه شده در این پژوهش آزمایشگاهی دارای رفتار غیر نیوتونی و شل شونده با برش بودند به طوری که با افزایش درجه برشی گرانیوی ظاهری محلولها کاهش یافت. مدل های رئولوژیکی مستقل از زمان به خوبی رفتار جریان نمونه های بستنی را توصیف نمودند. برازش مدل های مختلف دارای تنش تسلیم هم نشان داد که نمونه های تهیه شده دارای تنش تسلیم بوده و میزان متغیر مذکور وابسته به غلظت صمغ می باشد. روش سطح پاسخ ابزار مناسبی برای بررسی اثر ترکیبات فرمولاسیون بر خصوصیات رئولوژیکی نمونه های بستنی می باشد، بر این اساس برای برازش پارامترهای تنش تسلیم و ضریب قوام از بسط درجه دوم تیلور و برای برازش شاخص رفتار جریان از مدل رگرسیون خطی استفاده گردید. شاخص رفتار جریان و مقدار ضریب قوام مدل قانون توان با افزایش غلظت صمغ به ترتیب کاهش و افزایش نشان دادند. نتایج نشان دهنده عدم تفاوت معنی دار در خصوصیات رئولوژیکی بین نمونه های حاوی شکر و شیره انگور می باشد.

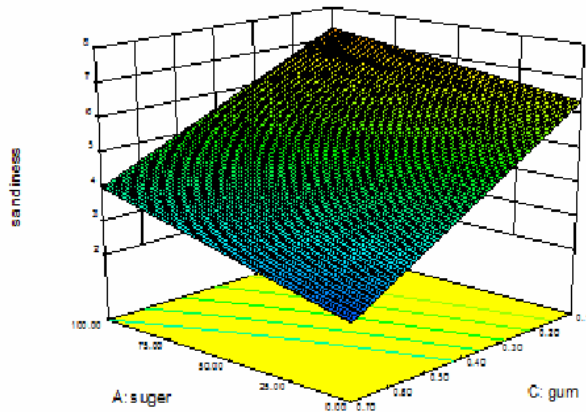
البته نیکرسون و همکاران [۳۰] تاثیر جایگزین نمودن ۵۰ درصد شربت ذرت را بر میزان شنی بودن بافت غیر معنی دار گزارش کردند. لازم به یاد آوری می باشد که قند شربت ذرت گلوکز است، این قند فاقد موتارتاسون پیچیده می باشد و در هنگام حل شدن در محلول تنوع ایزومریکی پایین تری ایجاد می کند.

#### ۳-۶-۳- پذیرش کلی

نتایج داوری حسی نمونه های حاوی کربوکسی متیل سلولز و بالنگو شیرازی هیچ تفاوت معنی دار آماری ( $P_{value} \leq 0/05$ ) در پذیرش مصرف کنندگان نداشته است. همچنین قابل توجه است که پذیرش کلی با افزایش سطح چربی از میزان ۷/۵٪ تا ۱۰٪ تغییر معنی داری ( $P_{value} \leq 0/05$ ) نداشته که این موضوع نشان دهنده موفقیت آمیز بودن کاهش میزان سطح چربی و در کنار حفظ پذیرش کلی محصول می باشد.

#### ۳-۲- بهینه سازی

بهینه سازی فرمولاسیون بر اساس فاکتورهای درصد چربی، میزان صمغ، درصد شکر، با توجه به شرایط ذکر شده در جدول ۷ با استفاده از نرم افزار Design expert انجام شد. با توجه به شرایط ذکر شده در جدول ۷ فرمولاسیون بهینه بستنی عبارت است از: غلظت چربی ۵/۶٪، غلظت صمغ بالنگو ۰/۶٪ میزان شیره انگور ۱۸٪. همچنین قابل ذکر است



شکل ۱۱ اثر صمغ و شکر به روی شنی بودن بافت نمونه در میزان ثابت ۶/۲۵٪ چربی و نوع صمغ CMC

جدول ۷ شرایط و نتایج بهینه یابی فرمولاسیون بستنی حاوی جایگزین چربی و شیره انگور

| متغیرها    | هدف       | بهینه | حد پایین | حد بالا |
|------------|-----------|-------|----------|---------|
| شکر        | حداقل     | ۰     | ۰        | ۱۰۰     |
| میزان صمغ  | در محدوده | ۰/۶   | ۰/۱      | ۰/۷     |
| درصد چربی  | حداقل     | ۵/۶   | ۲/۵٪     | ۱۰٪     |
| شاخص جریان | حداقل     | ۰/۳۶  | ۱/۸      | ۸/۴     |
| ضریب قوام  | حداکثر    | ۱۴/۰۱ | ۱/۷      | ۸/۲۵    |
| تنش تسلیم  | حداکثر    | ۲۷/۱۹ | ۳/۵      | ۷/۷۵    |
| پذیرش کلی  | حداکثر    | ۷/۵   | ۲/۲۵     | ۸/۲۵    |

### ۵- منابع

- [1] Parvar, M, Therani, M. 2011. Application and function stabilizer in ice cream. Food reviews international. 27: 389-407
- [2] Mohammad Amini A, Razavi S. M. A. 2012. Dilute solution properties of Balangu (*Lallemantia royleana*) seed gum: Effect of temperature, salt, and sugar. International Journal of Biological Macromolecules. 51: 235-243.
- [3] Romeih EA, Michaelidou A, Biliaderis CG, Zerfiridis GK. 2002. Low-fat white-brined cheese made from bovine milk and two commercial fat mimetics: chemical, physical and sensory attributes. International Dairy Journal. 12(6):525-40.
- [4] Tarrega A, Costell E, Rao M.A. 2006. Vane yield stress of native and cross-linked starch dispersions in skimmed milk: effect of starch concentration and 8-carrageenan addition, Food Sci Tech Int. 12(3): 253-260.

همچنین نمونه های حاوی صمغ بالنگو دارای ضریب قوام و تنش تسلیم بالاتر و شاخص رفتار جریان کمتری نسبت به نمونه های حاوی صمغ کربوکسی متیل سلولز بودند، این نتایج نشان می دهد صمغ دانه بالنگو مشابه صمغ های تجاری می-تواند به عنوان قوام دهنده، پایدارکننده و نگهدارنده آب بدون تاثیر منفی بر خصوصیات رئولوژیکی نمونه ها به کار برده شود. جایگزین کردن شیره انگور به دلیل افزایش تنوع ایزومریک قند های سیستم کلوییدی بستنی، شنی شدن را کاهش می دهد. فرمولاسیون بهینه با توجه به حداقل رساندن درصد چربی، شکر و شاخص رفتار جریان، همچنین حداکثر کردن میزان پذیرش کلی و تنش تسلیم و شاخص ضریب قوام عبارت بود از غلظت چربی ۵/۶٪، غلظت صمغ بالنگو ۰/۶٪. میزان شیره انگور ۱۸٪.



- emulsion stability of low calorie pistachio butter, *Food and Bioprocess Technology*, 5(5): 1581-1591.
- [16] Alpaslan, M. and M. Hayta, 2002. Rheological and The sensory properties of pekmez (grape molasses)/ tahin (sesame paste) blend. *Journal Food Engineering*, 54: 189-193
- [17] Koocheki, A., Mortazavi, S. A., Shahidi, F., Razavi, S. M. A. & Taherian, A. R. 2009. Rheological properties of mucilage extracted from *Alyssum homalocarpum* seed as a new source of thickening agent. *Journal of Food Engineering*. 91: 490-496.
- [18] Rioux, L. E., Turgeon, S. L., & Beaulieu, M. 2007. Rheological characterization of polysaccharides extracted from brown seaweeds, *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 87: 1630–1638.
- [19] Dakia, A. P., Blecker, C., Robert, C., Wathelet, B., & Paquot, M. 2008. Composition and physicochemical properties of locust bean gum extracted from whole seeds by acid or water dehulling pre-treatment. *Food Hydrocolloids*. 22: 807–818.
- [20] Vardhanabhuti, B., & Ikeda, S. 2006. Isolation and characterization of hydrocolloids from monoi (*Cissampelos pareira*) leaves. *Food Hydrocolloids*. 20: 885–891.
- [21] Farhoosh, R., & Riazi, A. 2007. A compositional study on two current types of salep in Iran and their rheological properties as a function of concentration and temperature. *Food Hydrocolloids*. 21: 660–666.
- [22] Ruguo, H., 1999, *Food Product Design: A Computer-Aided Statistical Approach*, CRC Press .85-172.
- [23] Sworn, G. 2000. *Handbook of hydrocolloids*, Phillips, G., O., Williams, P., A., eds, Boca Raton: CRC Press LLC, 103–115.
- [24] Sargolzaei, J., Hedayati Moghaddam, Amin., Shayegan, Jalal. 2011. Statistical assessment of starch removal from starchy wastewater using membrane technology. *Korean J. Chem. Eng.* 28: 1889-1896.
- [25] Khandari, P., Gill, B. S., & Sodhi, N. S. 2002. Effect of concentration and temperature on the rheology of mango pulp. *Journal of Food Science and Technology*. 39: 152–154.
- [5] Mohammad Amini A. 2007. Extraction optimization of Balangu seed gum and effect of Balangu seed gum on the rheological and sensory properties of Iranian flat bread, MSc thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
- [6] Guinard JX, Zoumas C, Mori L, Uatoni B, Panyam D, Kilara A. 1997. Sugar and fat effects on sensory properties of ice cream. *Journal of Food Science*. 62 (5):1087-94.
- [7] Marcotte, M., Taherian, A. R., and Ramaswamy, H. S. 2001. Rheological properties of selected hydrocolloids as a function of concentration and temperature. *Food Hydrocolloids*, 34: 695-703.
- [8] Arslan, E., M.E. Yener and A. Esin. 2005. Rheological characterization of tahin/pekmez (sesame paste/ concentrated grape juice). *Journal Food Engineering*, 69: 167-172.
- [9] Soukoulis, C., Lebesi, D., Tzia, C. 2009. Enrichment of ice cream with dietary fibre: Effects on rheological properties, ice crystallisation and glass transition phenomena. *Food Chemistry*. 115: 665-671.
- [10] Soukoulis, C., Chandrinos, I., Tzia, C. 2008. Study of the functionality of selected hydrocolloids and their blends with  $\kappa$ -carrageenan on storage quality of vanilla ice cream. *LWT - Food Science and Technology* 41, 1816-1827.
- [11] Steffe, J. F. 1996. *Rheological Methods in Food Process Engineering* (second edition), Michigan: Freeman Press. 121-178
- [12] M.Bahramparvar\* 1, M.H.Haddad khodaparast2, A.Mohammad Amini, 2008, Effect of substitution of carboxymethylcellulose and salep gums with *Lallemantia royleana* hydrocolloid on ice cream properties, *Iranian Journal of Food Science and Technology*. 4,37-47
- [13] Razavi, S. M. A., Karazhiyan, H. 2009. Flow properties and thixotropy of selected hydrocolloids Experimental and modeling studies. *Food Hydrocolloids*. 23: 908-912.
- [14] Razavi, S.M.A., M.B. Habibi Najafi and Z. Alaei, 2007. The time independent rheological properties of low fat sesame paste/ date syrup blends as a function of fat substitutes and temperature. *Food Hydrocolloids*. 21: 198-202.
- [15] Emadzadeh, B., Razavi, S. M. A. & Nassiri Mahallati, M. 2012. Effects of fat replacers and sweeteners on the time-dependent rheological characteristics and

- [28] Aime, D.B., Arntfield, S.D., Malcolmson, L.J., Ryland, D., 2001. Textural analysis of fat reduced vanilla ice cream products, *Food Research International*. 34, 237-246.
- [29] Deman.M.j.2003, principal of food chemistry, Ghanbarzadeh,B,Theran,
- [30] Nickerson, T. A. (1956). "Lactose Crystallization in Ice Cream. II. Factors affecting Rate and Quantity." *Journal of Dairy Science* 39(10): 1342-1350.
- [26] Dail, R. V., & Steffe, J. F. 1990. Rheological characterization of crosslinked waxy maize starch solutions under low acid aseptic processing conditions using tube viscometry techniques. *Journal of Food Science*.55: 1660–1665.
- [27] Sae-kang, V., & Suphantharika, M. 2006. Influence of pH and xanthan gum addition on freeze-thaw stability of tapioca starch pastes. *Carbohydrate Polymers*. 65: 371–380.

## Modeling of flow behavior and rheological properties and formulation optimization of ice cream using RSM

Tabatabaei Yazdi, F. <sup>1\*</sup>, Alghooneh, A. <sup>2</sup>, Khodaei, D. <sup>3</sup>, Alizadeh Behbahani, B. <sup>2</sup>

1. Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
2. Ph.D student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
3. M.Sc Student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

(Received: 93/5/12 Accepted: 93/9/24)

Ice cream is a complex food colloid including fat droplet and air cells that dispersed on the relatively frosted aqueous phase. In this research work, the effect of the fat at the four level ( 2.5, 5, 7.5, 10 % ) , pekmez at the three level ( 0, 9, 18 % ) , two types of hydrocolloids (Carboxyl Methyl Cellulose and balangu ) each at the four level ( 0.1, 0.3 ,0.5 , 0.7 % ) on the viscous flow properties and total acceptance of ice cream by response surface methodology (RSM) was investigated. The flow behavior of all samples using Power law, Casson, Bingham and Herschel- Bulkley models was investigated. According to the  $R^2$  ( $\geq 0.99$ ) and RMSE ( $\leq 0.9314$ ) values, it is obvious that the Power law model is highly appreciated for describe flow behavior of ice cream samples. Also the Result indicated that casson plastic model was highly significant for evaluate yield stress of ice cream samples. Samples containing Balangu gum has higher consistency coefficient and yield stress and lower flow behavior index than samples containing CMC. Its worth to mention that Herschel-Bulkley model gave negative values for yield stress which has no physical meaning. Balangu seed gum (BSG) in comparison to carboxyl methyl cellulose did not have a significant effect ( $P > 0.05$ ) on the total acceptance. The Desirability function has been achieved as 0.93 which, itself, indicates the accuracy of optimization. The optimum formulation has been found as following: fat of 5.6%, BSG of 0.6% , Pekmez of 18%, respectively.

**Key words:** Modeling, Optimization, Ice cream, RSM, Balangu, Carboxyl Methyl Cellulose

---

\* Corresponding Author E-Mail Address: tabatabai@um.ac.ir