نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۸، شماره ۱، بهار ۱۳۹۱، ص. ۷۲-۶۰

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 8, No. 1, 2012, p. 60-72

بهینه‌یابی شرایط تصفیه شربت خام چغندرقند با استفاده از بنتونیت با روش سطح پاسخ (RSM)

عیسی جاهد[۱]- محمد حسین حداد خداپرست [۲*] - خلیل بهزاد[۳] – محمد الهی[۴] – آرش کوچکی[۵]

تاریخ دریافت ۸۹/۱۲/۱۴
تاریخ پذیرش ۹۰/۵/۱۸

چکیده

در این تحقیق از روش سطح پاسخ (RSM) برای تعیین شرایط بهینه فرآیند تصفیه شربت خام چغندرقند با استفاده از بنتونیت جهت تولید قند مایع انورته استفاده شد. برای این منظور فاکتورهای موثر بر فرآیند تصفیه شامل غلظت بنتونیت (۱-۵ gr/li)، pH (۶-۳/۵) و دما (۹۵-۳۵ °C) مورد بررسی قرار گرفت. برای هر پاسخ مدل چند جمله ای درجه دوم با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی چند متغیره به دست آمد. ضرایب تبیین مدل‌های رگرسیونی برازش شده برای پارامترهای رنگ، کدورت، خاکستر، درجه خلوص اصلاح شده و قند انورت در فرآیند تصفیه شربت به ترتیب ۰/۹۵، ۰/۸۹، ۰/۹۰، ۰/۹۱ و ۰/۹۶ تعیین شدند. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت بنتونیت میزان کدورت افزایش ولی درجه خلوص اصلاح شده کاهش یافت در حالی که این متغیر تاثیر معنی‌داری بر سایر پارامترها نداشت. هم چنین با کاهش pH جداسازی عوامل ایجاد رنگ و کدورت توسط بنتونیت افزایش، ولی جداسازی خاکستر کاهش یافت. با افزایش دما از ۳۵ °C به ۹۵ °C، حذف عوامل ایجاد رنگ و کدورت روند افزایشی داشت و میزان قند انورت و درجه خلوص اصلاح‌شده نیز افزایش یافت در حالی که این متغیر تاثیر معنی‌داری بر میزان خاکستر شربت نداشت. شرایط اپتیمم تصفیه شربت خام چغندر با استفاده از بنتونیت جهت به حداقل رساندن میزان رنگ، کدورت و خاکستر و همچنین به حداکثر رساندن میزان قندانورت و درجه خلوص اصلاح شده که در آزمایش های عملی مورد تایید قرارگرفت، برای پارامترهای مستقل شامل غلظت بنتونیت، pH و دما به ترتیب ۱/۷ gr/li، ۴/۴۷ و ۷۵ °C به دست آمد. در این نقطه بهینه میزان رنگ، کدورت، خاکستر، درجه خلوص اصلاح شده و قند انورت به ترتیب ۱۶۶۴ (ICU_{420})، ۶/۳۰ (NTU) ، ۰/۵۵ (٪)، ۹۳/۹ (٪) و ۱/۶۰ (٪) تعیین شد.

مقدمه

ترکیب چغندرقند بر حسب نژاد، عوامل زراعی خاک و کوددهی، شرایط آب و هوا در طی فصل رشد، درجه بلوغ و شرایط نگهداری در زمان بین برداشت و مصرف متغیر است اما به طورکلی شامل ۷۵ درصد آب، ۱۷/۵درصد ساکاروز، ۵ درصد مارک، ۱/۱ درصد مواد آلی ازت دار، ۰/۵ درصد مواد معدنی و ۰/۹ درصد مواد آلی غیر ازته می باشد (۲). مواد غیر قندی موجود در شربت خام چغندرقند شامل ترکیبات رنگی، پلی ساکاریدها، پروتئین ها، مواد معدنی و ... است که به صورت محلول حقیقی یا کلوئیدی می باشد. مهم‌ترین هدف در صنعت قند از دیدگاه اقتصادی و کیفیت محصول، کاهش هر چه بیشتر مقدار مواد غیرقندی جهت افزایش درجه خلوص شربت قبل از کریستالیزاسیون است (۶). شربت خام بایستی تحت فرآیندهای خالص سازی از جمله روش‌های تصفیه شیمیایی و مکانیکی قرار گیرد. تصفیه شربت خام چغندرقند با استفاده از بنتونیت نیز جزء روش‌های شیمیایی محسوب می شود.

بنتونیت یک خاک‌رس از گروه مونتموریلونیت[۶] (کلسیم، سدیم، منیزیم و آلومینیم سیلیکات[۷]) می باشد که بسته به یون قابل تبادل که در آن غالب است به دو صورت سدیم بنتونیت و کلسیم بنتونیت طبقه بندی می شود. بنتونیت به صورت تجاری به شکل دانه و یا پودر در دسترس است که دارای رنگ طوسی روشن و یا مایل به قرمز می باشد. سطح کریستال‌های مونتموریلونیت دارای بار منفی و سطح جانبی آن دارای بار مثبت بوده و در مجموع غلظت بار منفی آن بیشتر

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲- استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: Email: khodaparast@um.ac.ir)
۳، ۴ و ۵- استادیاران گروه علوم صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

6- Montmorillonite
7- Al2O3.2MgO.24SiO2.6H2O(Na2O.CaO)

می باشد (۱). بنتونیت به وسیله ویژگی جذب آن ارزش زیادی در صنعت دارد که دلیل آن سطح مخصوص، توانایی تورم و ظرفیت تبادل یونی بالای بنتونیت است و بسیاری از این خصوصیات مربوط به استخلاف‌های ایزومورفیک کریستال‌های آن است (۲۳). بنتونیت در آب و شربت به صورت کلوئیدی حل شده ودارای ویژگی جذب آب و در نتیجه دارای خاصیت منبسط شدن است.کاربرد مهم این ترکیبات در تصفیه، رنگبری و پایدار کردن روغن های گیاهی در طول دوره نگهداری قبل از مصرف در بازار است. که این عمل را از طریق کاهش مقدار کلروفیل، کارتن و سایر رنگدانه‌های موجود در گیاه، کاهش Fe^{3+}, Cu^{2+}، فسفولیپیدها، مواد صابونی و جلوگیری از افزایش اسیدهای چرب آزاد در طول فرآیند رنگبری انجام می دهند (۲۱). هم چنین از بنتونیت برای شفاف سازی آب سیب استفاده می شود که با استفاده از مکانیسم جذب سطحی، پروتئین ها، یون فلزات سنگین، سموم شیمیایی و ترکیبات کدر را حذف می کند (۱۷).

میزان تورم و خاصیت رنگبری بیشتر بنتونیت ها در حالت طبیعی و اولیه مطلوب نیست، بنابراین لازم است که تغییراتی ایجاد شود تا خواص مورد نظر درآن تشدید گردد. مثلا کلسیم بنتونیت را می توان با کربنات سدیم تیمار کرد که نتیجه آن تبادل یون و جایگزینی سدیم به جای کلسیم و تولید بنتونیتی با انبساط پذیری اصلاح شده است. این ترکیب جدید سدیم-کلسیم بنتونیت یا NaCalit نامیده می شود. با این که سدیم بنتونیت نسبت به کلسیم بنتونیت بسیار موثرتر است، امادر این حالت حجم رسوب متشکله زیاد خواهد بود. لذا برای ایجاد شفافیت مطلوب بهتر است از NaCalit استفاده گردد، بدین ترتیب نقطه بهینه بین جذب سطحی و حجم رسوب به دست می آید. علاوه بر این بعضی از خصوصیات این کانی‌های رسی معمولا به وسیله فعال سازی با اسید های معدنی که شامل تعدادی واکنش های شیمیایی می باشد و منجر به پروتون دارکردن سطح کانی های رسی و افزایش سطح مخصوص از ۶۰-۴۰ تا حدود ۲۰۰ m^2/gr می شود، بهبود می‌یابد (۱۱). عواملی که در چگونگی عملکرد بنتونیت در شفاف سازی موثرند شامل دما، pH ، روش تهیه بنتونیت و عمل همزدن می باشند (۴). غلظت بار منفی بنتونیت بسته به pH محیط و جنس بنتونیت متغیر می باشد. در pH= ۳ -۴ زتا پتانسیل سدیم بنتونیت بین ۱۵- الی ۲۰- میلی ولت و در مورد NaCalit بین ۲۰- الی ۲۵- متغیر می باشد. به موازات افزایش غلظت بارمنفی، قدرت شفاف‌کنندگی بنتونیت نیز افزایش می یابد. بنتونیت دارای خاصیت جذب سطحی و جذب عمقی و هم چنین دارای بار منفی و یون‌های قابل مبادله می باشد. هر یک از این خصوصیات نقش مهمی در جداسازی ناخالصی ها در شربت ها دارند. با استفاده از بنتونیت پروتئین موجود در شربت از طریق جذب سطحی آن ها، کاملا جدا می شوند ولی در مقدار اسیدهای آمینه تغییر چندانی ایجاد نمی کند و فقط مقدار آن را حدود ۱۰ درصد کاهش می دهد (۱). بنتونیت هم چنین با جذب سطحی مواد فنلی موجود درشربت مقدارآن را حدود ۴۳-۱۳ درصدکاهش می‌دهد. به علاوه بنتونیت باعث کاهش میزان یون فلزات سنگین و باقیمانده سموم (حشره‌کش ها) و کاهش مقدار آمین‌های بیوژنیک می شود (۱). اردگان و همکاران (۱۹۹۶) تاثیر ۵ نوع بنتونیت، یک سپیولیت[1] و یک دیاتومیت[2] را در جداسازی رنگ و کدورت در عصاره چغندرقند در حضور نمک آمونیوم چهار ظرفیتی[3] و بدون آن بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که بدون نمک آمونیوم چهارظرفیتی درصد کاهش رنگ و کدورت با بنتونیت ۲۹ درصد، با سپیولیت ۳۲ درصد و با دیاتومیت ۳درصد می باشد. و در صورتی که با افزودن ppm ۶۰۰ نمک آمونیوم چهار ظرفیتی همراه باشند درصد تغییرات در رنگ و کدورت با بنتونیت به۳۳ درصد، با سپیولیت به ۴۴ درصد و با دیاتومیت به ۳۱/۵ درصد خواهد رسید (۱۲). در این تحقیق تاثیر مقدار بنتونیت، pH و دمای فرآوری برروی پارامترهای رنگ، کدورت، خاکستر، درجه خلوص اصلاح شده و قند انورت مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که به دلیل اسیدی بودن شرایط آزمایشات و تولید قند انورت، تحقیق حاضر مقدمه ای برای تولید قند مایع انورته می باشد و تولید شکر کریستالیزه در این تحقیق مورد نظر نمی‌باشد. بنابراین هدف از انجام این پژوهش، تصفیه شربت خام چغندرقند به منظور تولید قند مایع انورته برای مصرف در صنایع مختلف ازجمله نوشابه و کنسروسازی بدون نیاز به حل کردن مجدد و هیدرولیز کریستال‌های شکر می‌باشد.

مواد و روش ها

مواد و تجهیزات: این پژوهش در سطح آزمایشگاهی در کارخانه قند شیرین خراسان انجام گرفت. شربت خام از واحد دیفوزیون کارخانه قند شیرین نمونه برداری شد. مواد و تجهیزات مورد استفاده شامل بنتونیت ازنوع سدیم-کلسیم بنتونیت (Nacalite ، آلمان) که از کارخانه ایران شهد مشهد تهیه شد، pH متر دیجیتالی مجهز به دماسنج[4] ، رفراکتومتر[5]، همزن مغناطیسی، اسپکتروفتومتر[6]، کدورت سنج[7] ، بن‌ماری[8]، دستگاه کنداکتیویمتر[9]، پلاریمتر[10] کاغذ صافی واتمن[11]، اسید سیتریک، کربنات سدیم، محلول مولر، محلول

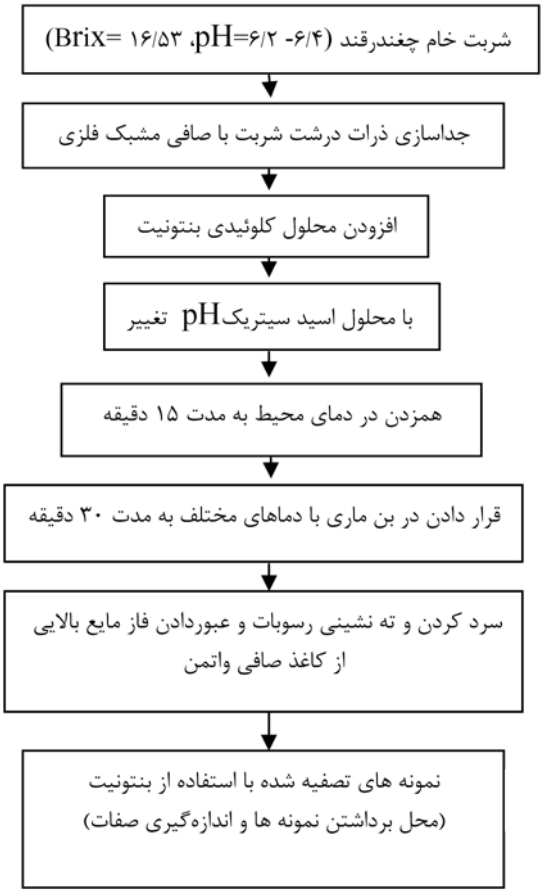
1- Sepiolite
2- Diatomite
3- Quartamin D86
4- Model 9812-5, Romania
5- Hi 96801
6- Cambridge England
7- Model 6035 ,turbidimeter Jenway
8- Water Bath, type w 350B
9- Model 380BA, UK
10- Saccharomat, schmidt+haensch
11- Whatman 42

ید، چسب نشاسته، تیوسولفات، اسیداستیک، دماسنج شیشه ای و سایر وسایل آزمایشگاهی بود.

روش ها: به منظور تصفیه شربت خام چغندرقند ۲۰۰ میلی لیتر شربت خام در یک ارلن ۵۰۰ میلی لیتری ریخته شد. بنتونیت فقط زمانی عمل می نماید که آبدار باشد، در این صورت مانند مبدل یون عمل می نماید، بنابراین بنتونیت باید قبل از مصرف مدتی در داخل آب خیسانیده شود لذا محلول ۲۰ درصد بنتونیت ۱۲-۸ ساعت قبل از انجام آزمایشات آماده شد. سپس مقدار مورد نظر بنتونیت به صورت محلول ۲۰ درصد به ارلن اضافه شد. به دلیل اسیدی بودن خاصیت بنتونیت، pH مخلوط را اندکی کاهش می دهد. لذا ابتدا بنتونیت را اضافه کرده و سپس pH مخلوط توسط اسید سیتریک در pH مورد نظر تنظیم شد. مخلوط شربت خام و بنتونیت به مدت ۱۵دقیقه توسط همزن مغناطیسی در دور پایین در دمای محیط به همزده شد تا واکنش ها تکمیل گردد. ارلن حاوی نمونه به داخل بن ماری منتقل و پس از نیم ساعت در دمای مورد نظر، توسط آب سرد تا دمای محیط سرد شد. محلول سرد شده توسط فیلترهای کاغذی صاف و بلافاصله پارامترهای مورد نظر اندازه‌گیری گردید. شمای کلی مراحل مختلف تصفیه شربت خام چغندرقند با استفاده از بنتونیت در شکل ۱ نشان داده شده است.

در این مطالعه تیمارهایی که روی شربت خام اعمال شد شامل غلظت بنتونیت (۵-۱ گرم در لیتر)، pH (۶-۳/۵) و دمای فرآوری (۹۵C-۳۵) بودند و پارامترهای اندازه‌گیری شده پس از تصفیه شربت خام با بنتونیت شامل کدورت (طول موج۹۰۰ نانومتر)، رنگ (طول موج۴۲۰ نانومتر)، خاکستر، درجه خلوص اصلاح شده و قند انورت بودند که طبق روش استاندارد ایکومزا اندازه‌گیری شدند (۳). برای ارزیابی کارایی این تکنیک در تصفیه شربت خام و اینکه این روش تا چه حد قادر است ناخالصی ها را از قندهای مورد نظر جداسازی کند، لازم بود شاخصی مبنی بر مقدار قندهای مورد نظر نسبت به مواد غیر قندی (عوامل ایجاد رنگ، کدورت و مواد معدنی و ...) ارائه گردد (شبیه کوسیان در تصفیه مرسوم).

از آنجایی که هدف از این تحقیق تصفیه شربت خام به منظور تولید قند مایع انورته می باشد، لذا علاوه بر ساکارز، قندهای انورت نیز به عنوان قندهای مورد نظر و مطلوب در این تصفیه محسوب می‌شوند.



شکل ۱- شمای کلی مراحل مختلف تصفیه شربت خام چغندرقند با استفاده از بنتونیت

بنابراین هرچه میزان قند انورت و ساکارز بیشتری از ناخالصی ها جدا شود، نشان دهنده شرایط بهتر تصفیه می باشد. برای این منظور با تغییراتی در فرمول درجه خلوص معمولی از درجه خلوص اصلاح شده استفاده گردید.

$$Q_{adjusted} = \frac{Saccharose + Invert\ sugar}{Brix} \times 100 \quad (۱)$$

لازم به ذکر است که چون شرایط انجام آزمایشات اسیدی بود و در شرایط اسیدی و حرارت بالا احتمال تشکیل هیدروکسی متیل فورفورال که یک ترکیب سرطان زا است از گلوکز و فروکتوز وجود دارد، لذا به منظور بررسی امکان تولید این ترکیب در نمونه های مورد آزمایش، تست آلفا نفتول (بخشی از تست مولیش) انجام شد که جواب تست منفی بود در نتیجه مشخص شد گرچه احتمال تشکیل HMF[1] در محیط وجود دارد ولی به دلیل ناپایداری این ترکیب، در صورت وجود ممکن است مقداری از آن تجزیه شده باشد. همچنین با توجه به وجود ماده فعال سطحی در محیط، امکان جذب آن توسط بنتونیت وجود دارد. لذا این احتمال وجود دارد که مقدار HMF موجود در محیط شربت کمتر از مقداری بوده است که توسط این تست قابل تشخیص باشد.

طرح آزمایشی و آنالیز آماری

به منظور تعیین اثر متغیرهای مستقل (شامل غلظت بنتونیت x_1، pH x_2، دمای واکنش x_3) بر متغیرهای وابسته (شامل رنگ، کدورت، درجه خلوص اصلاح شده خاکستر و قند انورت) از روش سطح پاسخ[2] استفاده شد. طرح مرکب مرکزی[3] برای طراحی داده های آزمایشی بکار برده شد. داده های آزمایشی با استفاده از نرم افزار Design Expert مدل ۶/۰/۲ (مینا پولیس آمریکا[4]) مدلسازی شده و شکل های سه بعدی جهت بررسی روند تغییرات رسم شدند. طرح شامل ۲۰ آزمایش بوده که دارای ۶ نقطه مرکزی و ۶ نقطه محوری و 2^3 نقطه طرح فاکتوریل می باشد. نقاط مرکزی روشی برای تخمین و ارزیابی خطای آزمایشات و اندازه‌گیری ضعف برازش[5] است. نقاط محوری برای ارزیابی رفتار غیر خطی مدل به طرح فاکتوریل اضافه شده‌اند و طرح به صورت کاملا تصادفی انجام شد. توابع پاسخ (y شامل رنگ، کدورت، خاکستر، درجه خلوص اصلاح شده و قند انورت بود که در حالت کلی به صورت تابعی از متغیر های کدبندی شده (X_i ، i=1,2,3) توسط چندجمله ای درجه دوم به صورت معادله زیرنشان داده می شود.

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + \varepsilon \quad (۲)$$

ضرایب مدل چند جمله ای به صورت b_0 (عبارت ثابت)، b_1، b_2، b_3 (اثرات خطی)، b_{11}، b_{22}، b_{33} (اثرات درجه دوم) و b_{12}، b_{13}، b_{23} (اثرات متقابل) بیان شده اند. معنی‌دار بودن هر یک جملات در معادله رگرسیونی مورد بررسی قرار گرفت و عبارات معنی‌دار در مدل توسط آنالیز واریانس (ANOVA) برای هر پاسخ مشخص شد. کارایی مدل توسط R^2 و $R^2_{adjusted}$ بررسی شد. از تکنیک اپتیمم‌کردن عددی نرم افزار Design Expert برای اپتیمم‌کردن همزمان چندین پاسخ استفاده شد. اهداف و محدوده مورد نظر برای هر متغیر و پاسخ انتخاب شد، همه متغیرهای مستقل در محدوده، در حالی که پاسخ ها در حداقل یا حداکثر بودند. در نهایت برای مشخص‌کردن کارایی این روش، نقطه بهینه به دست آمده در این آزمایش با روش تصفیه کلاسیکی شربت چغندرقند مورد مقایسه قرار گرفت.

نتایج و بحث

برازش مدل: مدل سطح پاسخ چند جمله درجه دوم (معادله ۲) برای هر یک از متغیرهای وابسته (Y) برازش شد. برای مطابقت مدل‌های توضیحی و تغییرات رنگ، کدورت، خاکستر، درجه خلوص و قند انورت مجموع مربعات مدل آنالیز شد. این آنالیز نشان داد که افزایش شرایط معنی‌داری درجه دومی باعث بهبود مدل می شود، بنابراین می تواند مناسب ترین مدل برای متغیرهای وابسته باشد. آنالیز رگرسیون و جدول ANOVA برای برازش مدل و همچنین معنی‌داری شرایط از نظر آماری مورد استفاده قرار گرفت. ضرایب رگرسیونی مدل چند جمله درجه دوم، $R^2_{adjusted}$ و R^2 برای متغیرهای وابسته در جدول ۱ آورده شده است. ضریب تبیین (R^2) به عنوان نسبت تغییرات توصیف شده توسط مدل به تغییرات کل بیان می‌شودکه معیاری از درجه تناسب برازش می باشد. بنابراین هرچه مقدار R^2 به یک نزدیک‌تر شود، قدرت مدل برازش یافته در توصیف تغییرات پاسخ به عنوان تابعی از متغیرهای مستقل بیشتر می باشد. برای یک مدل با برازش خوب، مقدار R^2 بایستی حداقل ۰/۸ باشد (۱۶). R^2 برای رنگ، کدورت، خاکستر، درجه خلوص اصلاح شده و قند انورت به ترتیب ۰/۹۵، ۰/۸۹، ۰/۹۰، ۰/۹۱ و ۰/۹۶ به دست آمد. آزمون ضعف برازش نشانه ای از نقص 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 معنی‌دار باشد پاسخ‌ها با احتمال ضعیفی توسط مدل پیش بینی می شود لذا این آزمون نباید معنی دار باشد (جدول ۱). معنی دار بودن اندیس

1- Hydroxymethyl Furfural
2- Response Surface Methodology
3- Central Composite Design
4- Statease Inc. Minneapolis,USA
5- lack of fite

($P < ۰/۰۵$) نیز برای تغییرات انتخاب شده به معنای مناسب بودن مدل برای تخمین پاسخ های مربوطه است. لازم به ذکر است که اضافه کردن یک متغیر به مدل همیشه باعث افزایش R^2 می شود صرفنظر از اینکه متغیر اضافه شده از نظر آماری معنی‌دار باشد یا نباشد. به این ترتیب بالا بودن R^2 همیشه کفایت مدل را نشان نمی دهد. به همین دلیل بهتر است از $R^2_{adjusted}$ نیز برای بررسی مناسب بودن مدل استفاده شود. بر خلاف R^2، $R^2_{adjusted}$ تنها در صورتی افزایش می‌یابدکه شرایط جدید، مدل را بیش از حالتی که از نظر تصادفی مورد انتظار است بهبود بخشد (۱۶). بالا بودن $R^2_{adjusted}$ در این طرح نشان می دهد که شرایط غیر معنی داری در مدل مشاهده نشده است.

۱- رنگ: تاثیر متغیر های مستقل بر کاهش رنگ شربت تصفیه شده با بنتونیت در شکل ۲ نشان داده شده است. در رابطه با تاثیر پذیری رنگ از مقدار بنتونیت می توان چنین عنوان کرد گرچه تاثیر مقدار بنتونیت بر میزان رنگ شربت از نظر آماری در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار نشده است ولی اثر آن قابل توجه است، زیرا نزدیک به معنی دار شدن است (جدول ۱). همان طورکه مشاهده می شود، بنتونیت در غلظت های پایین باعث کاهش رنگ شده است ولی با افزایش مقدار بنتونیت از یک حد مشخصی، میزان رنگ شربت تصفیه شده افزایش یافته است (شکل۲).

این امر نشان می دهد که مقدار اضافی بنتونیت در محیط می‌تواند به عنوان عامل ایجاد رنگ عمل کند (۴). بررسی منابع نشان می دهد که کاهش رنگ به جذب مواد رنگی توسط ذرات بنتونیت مربوط می‌باشد. مواد رنگی در شربت چغندرقند ساختارهای پیچیده و اندازه های متفاوتی دارند و عمدتا خاصیت غیر قطبی دارند و بعضی نیز تا حدودی قطبی هستند. بسیاری از مواد معدنی به ویژه مونتموریلونیت ها به آسانی مولکول های آلی را جذب می کنند. عمل جذب به عوامل مختلفی از جمله شکل و اندازه مولکولی مواد جذب شده، غلظت آن در محیط، اثر نیروهای واندروالسی، طول زنجیره ذرات جذب شده و اثرات آنتروپی بستگی دارد (۱۲).

جدول۱- نتایج جدول آنالیز واریانس (ANOVA) مدل برازش یافته بر داده های پاسخ

منبع	درجه آزادی	رنگ (ICU)			کدورت (NTU)			خاکستر (٪)		
		ضرایب	مجموع مربعات	اندیسP	ضرایب	مجموع مربعات	اندیسP	ضرایب	مجموع مربعات	اندیسP
Model	9	15952.5	5.8×10^{7}	<.0001	20.3	457.16	0.0007	0.97	0.053	0.0005
Linear										
b_1	1	-976.01	1.2×10^{6}	0.055	0.4	67.08	0.005	0.04	0.0014	ns
b_2	1	-7331.4	3×10^{7}	<.0001	-0.21	112.9	0.0009	-0.14	0.05	<0.0001
b_3	1	59.67	3.7×10^{6}	0.003	-0.4	230.4	<.0001	-5×10^{-4}	0.0017	ns
Quadratic										
b_{11}	1	121.68	6.5×10^{5}	ns	-0.11	0.51	ns	-0.002	2×10^{-4}	ns
b_{22}	1	987.66	6.5×10^{6}	0.0005	0.33	0.74	ns	0.01	7×10^{-4}	ns
b_{33}	1	0.075	12614	ns	-0.003	17.44	ns	-4×10^{-6}	4×10^{-5}	ns
Interaction										
b_{12}	1	140.15	9.8×10^{5}	ns	0.38	7.22	ns	-0.008	0.003	0.04
b_{13}	1	-3.8	4.1×10^{5}	ns	-0.004	0.5	ns	8×10^{-5}	2×10^{-4}	ns
b_{23}	1	-16.51	3×10^{6}	0.006	-0.02	5.12	ns	3×10^{-4}	8×10^{-4}	ns
Residual	10	-	2.5×10^{6}	-	-	52.35	-	-	0.005	-
Lack of fit	5	-	2×10^{6}	0.07	-	14.28	0.062	-	0.003	0.33
Pure error	5	-	4.7×10^{5}	-	-	9.38	-	-	0.0021	-
Total	19	-	6×10^{7}	-	-	501.51	-	-	0.06	-
R^2	-	0.96	-	-	0.89	-	-	0.90	-	-
$R^2_{adjasted}$	-	0.92	-	-	0.81	-	-	0.82	-	-

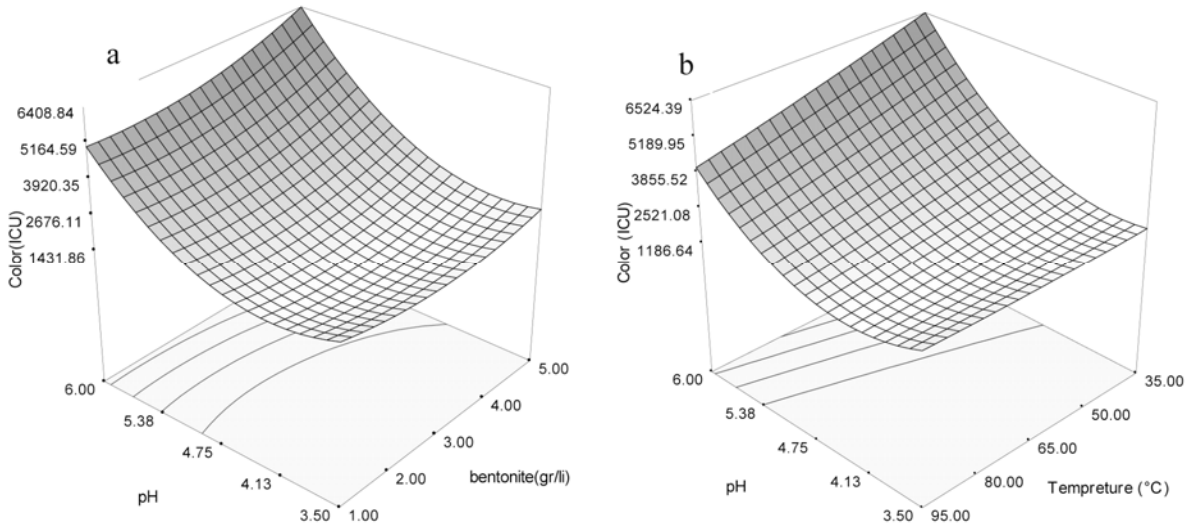
ادامه جدول ۱

منبع	درجه آزادی	درجه خلوص (٪)			قند انورت (٪)		
		ضرایب	مجموع مربعات	اندیس P	ضرایب	مجموع مربعات	اندیس P
Model	9	92	76.99	0.0003	14.4	50.92	<0.0001
Linear							
b_1	1	0.27	7.66	0.0087	0.16	0.055	ns
b_2	1	-0.83	29.93	<0.0001	-7.56	23.37	<0.0001
b_3	1	0.13	27.23	0.0001	0.18	9.44	<0.0001
Quadratic							
b_{11}	1	-0.15	1.11	ns	-0.03	0.038	ns
b_{22}	1	0.15	0.16	ns	0.86	5.04	0.0002
b_{33}	1	0.0004	0.32	ns	-4.42	0.0043	ns
Interaction							
b_{12}	1	-0.015	0.011	ns	0.016	0.013	ns
b_{13}	1	0.0048	0.6	ns	-1.6	0.073	ns
b_{23}	1	-0.03	10.35	0.0036	-0.03	9.97	<0.0001
Residual	10	-	7.23	-	-	1.62	-
Lack of fit	5	-	3.61	0.50	-	1.34	0.060
Pure error	5	-	3.62	-	-	0.28	-
Total	19	-	84.23	-	-	52.54	-
R^2	-	0.91	-	-	0.96	-	-
$R^2_{adjasted}$	-	0.84	-	-	0.94	-	-

تاثیر pH بر کاهش رنگ شربت در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طورکه مشاهده می شود pH تاثیر عمده ای بر کاهش رنگ داشت به طوری که با کاهش pH حذف رنگ افزایش یافت. معنی دار بودن اثرات خطی (P<۰/۰۰۰۱) و درجه دوم (P<۰/۰۵) موید این مطلب می باشد (جدول۱). در حذف ناخالصی های شربت چغندر دو عامل اصلی جذب سطحی و تاثیر متقابل بارها دخالت دارند. همان طورکه قبلا ذکر شد غلظت بار منفی بنتونیت بسته به pH محیط و جنس بنتونیت متغیر می باشد. در pH های اسیدی زتاپتانسیل بنتونیت Nacalite از نظر بار منفی بالا است و به همین دلیل این نوع بنتونیت در محیط اسیدی برای جذب سطحی بهتر عمل می کند (۱و۴). Shen و همکاران (۲۰۰۹) و Li و همکاران (۲۰۱۰) با تحقیق بر جذب رنگ‌های آنیونی توسط انواع بنتونیت، به این نتیجه رسیدند که کارایی حذف این رنگ‌ها توسط بنتونیت با کاهش pH افزایش می یابد. آن‌ها گزارش دادند که بار سطح بنتونیت در محدوده pH آزمایشات (۱۱-۳= pH) مثبت بود. در pH های پایین اکثر مولکول های رنگی می توانند جذب بنتونیت شوند. در ساختار رنگ های آنیونی گروههای SO_3^- وجود دارد. علاوه بر این طبق تئوری اسید و باز لوئیس در pH های پایین مولکول های رنگ دارای بار منفی قوی به دلیل پروتون دارکردن گروه‌های SO_3^- هستند. در نتیجه نیروی جاذبه الکترواستاتیکی بین بارهای منفی یون های SO_3^- و بارهای مثبت مکان های جذب وجود دارد. بنابراین جذب رنگ های آنیونی توسط بنتونیت به طور معنی داری افزایش می یابد (۱۸، ۲۰و۲۲). در محیط قلیایی از یک طرف زتا پتانسیل بنتونیت با افزایش pH کاهش می یابد و از طرفی دیگر بین جذب یون های OH^- و رنگ‌های آنیونی رقابت به وجود می آید بنابر این کارایی حذف رنگ با افزایش pH کاهش می یابد (۲۲).

دما نیز تاثیر زیادی در حذف مواد رنگی توسط بنتونیت داشت (شکل b-۲). از ضرایب مدل برازش شده بر داده‌های رنگ چنین بر می‌آید که تغییرات رنگ با دما بدون ارتباط با سایر متغیرها، یک روند خطی (P<۰/۰۵) را دنبال می کند (شکل b- ۲)، به طوری‌که با افزایش دما حذف مواد رنگی افزایش می یابد. نتایج مشابهی توسط Gokmen و همکاران (۲۰۰۲) وKoyuncu و همکاران (۲۰۰۷) گزارش شده است که با افزایش دما کارایی جذب ترکیبات عامل کدورت و رنگ در آب سیب به ترتیب توسط رزین های جاذب و بنتونیت افزایش می یابد.

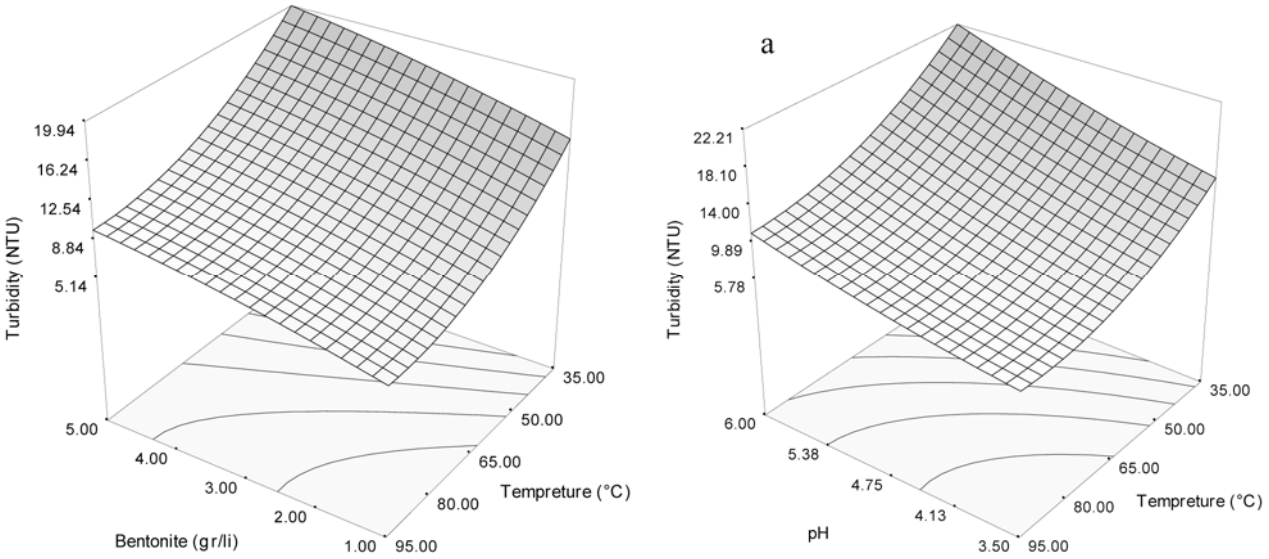
فرمانی و همکاران (۱۳۸۵) نیز اعلام کردند که با افزایش دما حذف ترکیبات عامل ایجاد رنگ و کدورت از شربت خام نیشکر توسط بنتونیت افزایش می یابد.



شکل ۲- نمودار سطح پاسخ برای اثر (a) مقدار بنتونیت و pH (٦٥ °C =دما) و (b) درجه حرارت و pH (۳ gr/li= بنتونیت) بر رنگ شربت تصفیه شده با بنتونیت

۲- کدورت: در شکل ۳ تاثیر متغیرهای مستقل بر تغییرات کدورت شربت خام چغندر قند نشان داده شده است. آنالیز واریانس اثر کلی متغیرهای فرآیند تصفیه شربت بر مدل رگرسیونی کدورت نشان داد، که تنها اثرات خطی (P<۰/۰۵) هر سه متغیر غلظت بنتونیت، pH و دمای واکنش در مدل معنی‌دار شد (جدول۱). اندیس P ضرایب مدل رگرسیونی کدورت با متغیرهای فرآیند هم چنین نشان می‌دهد که اثر دما (P<۰/۰۰۰۱) بر تغییرات کدورت بیشتر از اثر pH و غلظت بنتونیت (P<۰/۰۵) می باشد. تغییرات کدورت با غلظت بنتونیت روندی مشابه تغییرات رنگ با مقدار بنتونیت را نشان می دهد (شکلa-۳). همان طورکه مشاهده می شود غلظت بنتونیت به صورت خطی بر کدورت شربت تاثیر گذاشته است به طوری‌که با افزایش مقدار بنتونیت، کدورت شربت افزایش یافته است. بنتونیت پروتئین، یون فلزات سنگین و سایر ناخالصی های موجود در شربت را از طریق جذب سطحی جداسازی می کند، در نتیجه از ایجاد کدورت یا رسوب ثانویه جلوگیری می نماید (۱). در عمل نیز مشاهده شد که ناخالصی های موجود در شربت که به صورت ذرات پراکنده نتایج حاصل ازمجموع مربعات مدل نشان داد که اثر pH بر کاهش رنگ بیش از دمای فرآیند و اثر دمای واکنش نیز بیش از اثر غلظت بنتونیت است (جدول ۱). در شربت معلق بودند و باعث ایجاد کدورت و رنگ در شربت می شدند، تشکیل فلوک (ذرات کواگوله) داده و با عبور دادن شربت از صافی، در پشت صافی باقی مانده و از شربت حذف شدند. تاثیر دما و pH نیز بر تغییرات کدورت به صورت خطی بود (جدول۱). همان طور که در شکل۳ مشاهده می شود با افزایش دما و کاهش pH کارایی حذف عوامل ایجاد کدورت توسط بنتونیت افزایش یافته است. تیمار حرارتی مواد کلوئیدی در عصاره را منعقد می کند و با حضور بنتونیت در عصاره، مواد منعقد شده، تجمع پیدا کرده و این امر عمل صاف‌کردن عصاره را راحت تر می سازد (۹). همان طورکه برای تغییرات رنگ نیز بیان شد دلیل فعالیت بهتر بنتونیت در pH های پایین، در جداسازی ترکیبات عامل کدورت و رنگ این است که بنتونیت در شرایط اسیدی بار منفی بیشتری دارد و به موازات افزایش غلظت بار، قدرت شفاف کنندگی نیز افزایش می یابد. از آن جا که نقاط فعال یک کانی رسی (چه به عنوان جاذب و یا به عنوان کاتالیست) مکان های اسیدی آن است، فعالیت بنتونیت در شرایط اسیدی افزایش می یابد.

۳- خاکستر: آنالیز واریانس اثر کلی متغیرهای فرآیند بر مدل رگرسیونی خاکستر شربت نشان می دهد که تنها اثر متغیر pH در مدل معنی دار است (P<۰/۰۰۰۱) و اثر دو متغیر غلظت بنتونیت و درجه حرارت معنی دار نبود (جدول۱). روند تغییرات درصد خاکستر شربت در مقابل غلظت بنتونیت، درجه حرارت واکنش و pH در شکل۴ ارائه شده اند. با توجه به معنی‌دار نبودن تاثیر غلظت بنتونیت و درجه حرارت بر تغییرات خاکستر شربت (P>۰/۰۵) چنین نتیجه‌گیری می شود که تغییرات خاکستر شربت نسبت به غلظت بنتونیت و درجه حرارت واکنش حساسیت چندانی ندارد. این عدم وابستگی در نمودار رویه ها نیز به خوبی مشهود است (شکلa-۴ و -۴b). به طوری‌که با تغییر سطوح این متغیرها میزان تغییرات خاکستر شربت بسیار ناچیز بود. Mohammed و همکاران (۲۰۱۰) با تحقیقی که روی کارایی حذف یون Fe^{3+} در محلول آبی با استفاده از بنتونیت طبیعی انجام دادند به این نتیجه رسیدند که کارایی حذف یون Fe^{3+} با افزایش دما افزایش می یابد.



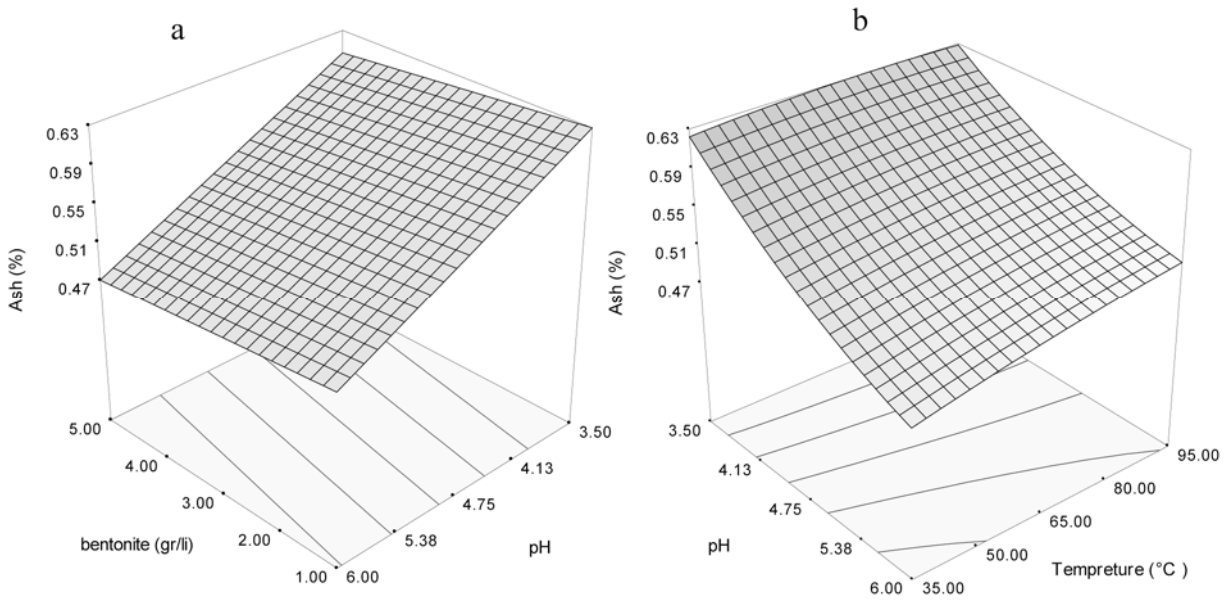
شکل ۳- نمودار سطح پاسخ برای اثر (a) درجه حرارت و بنتونیت (pH = ٤/٧٥) و (b) درجه حرارت وpH (gr/li ۳= بنتونیت) بر کدورت شربت تصفیه شده با بنتونیت

دو دلیل برای افزایش کارایی جداسازی خاکستر توسط بنتونیت قابل ذکر است. اولا درجه حرارت های بالا، یون های فلزی را برای افزایش جذب در مکان های جذب[1] مربوط به ماده جاذب فعال می کند و باعث حرکت سریع‌تر کاتیون های فلزی می شود (۱۰)، ثانیا دما باعث تسریع بعضی از مراحل اصلی واکنش شده و بعضی مکان های فعال جدید در سطح ماده جاذب ایجاد می کند (۱۵). از ضرایب مدل برازش شده بر داده های خاکستر شربت چنین بر می‌آید که تنها اثر معنی‌دار برای pH اثر خطی آن می باشد (جدول۱)، به طوری‌که با افزایش pH درصد خاکستر شربت کاهش یافته است. نتایج مشابهی توسط سایر محققان برای جذب بعضی عناصر سنگین مانند Zn، Cu، Ni، Cr توسط بنتونیت در pH=۳ به دست آمده است (۸). Altin و همکاران (۱۹۹۹) گزارش دادند که کارایی حذف Pb^{2+} توسط مونتموریلونیت در pH های پایین کاهش می یابد. مکانیسم هایی که بر ویژگی‌های جذب انواع بنتونیت تاثیر می‌گذارد می تواند به وسیله انحلال، تبادل یون، جذب سطحی و رسوب کردن مشخص شود. Kaya و همکاران (۲۰۰۵) اعلام کردند جذب یون های Zn^{2+} توسط بنتونیت با افزایش pH از ۳ تا ۸ روند افزایشی داشته و کمترین مقدار جذب در pH=۳ بود که این می تواند به دلیل افزایش در رقابت برای مکان های جذب به وسیله H^{+} و انحلال یون های AL^{3+} از لایه های آلومینیوم سیلیکات موجود در ساختار بنتونیت باشد.

٤- درجه خلوص : نتایج موجود در جدول ۱ نشان می دهد pH و دما در سطح بالایی در مدل معنی‌دار شده‌اند (P <۰/۰۰۰۱) در حالی که غلظت بنتونیت تنها در سطح ۱ درصد در مدل معنی‌دار بود (P<۰/۰۱). همان طورکه مشاهده می شود، اثرات درجه دومی هیچ کدام از متغیرهای مستقل در مدل معنی‌دار نبود، لذا انحنایی در مدل مشاهده نمی‌شود. در بین اثرات متقابل، تنها اثر متقابل بین pH و دمای فرآیند برای مقدار درجه خلوص اصلاح شده معنی‌دار بود (جدول ۱). نتایج حاصل از مجموع مربعات مدل نشان دادکه تغییرات درجه خلوص شربت عمدتا تحت تاثیر pH و دمای فرآیند و تا حد کمتری غلظت بنتونیت قرار دارد (جدول ۱).

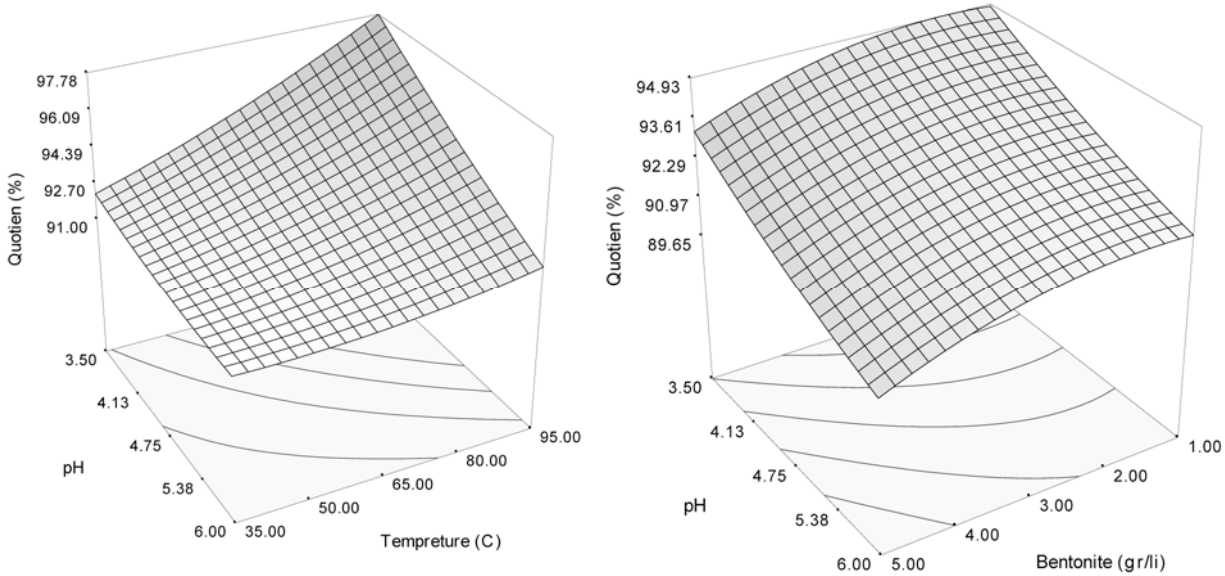
شکل ۵ اثر pH و غلظت بنتونیت (در حالی که دمای فرآیند ۶۵°C است) و دمای فرآیند و pH (درحالی که غلظت بنتونیت gr/li ۳ است) بر تغییرات درجه خلوص اصلاح شده را نشان می دهد. به‌طورکلی نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش دمای فرآیند و کاهش pH مقدار درجه خلوص اصلاح شده شربت افزایش یافت (شکل ۵). دلیل این امر این است از یک طرف با افزایش دما و کاهش pH به دلیل فعالیت بهتر بنتونیت و حذف بیشتر ناخالصی‌های شربت، بریکس شربت کاهش می یابد و از سوی دیگر به دلیل حساسیت ساکارز به این شرایط و تبدیل آن به قندهای احیاء کننده، میزان قند انورت شربت نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه مطابق رابطه ۱، هر دوی این عوامل باعث افزایش کوسیان اصلاح شده می‌گردد.

1- Adsorption site



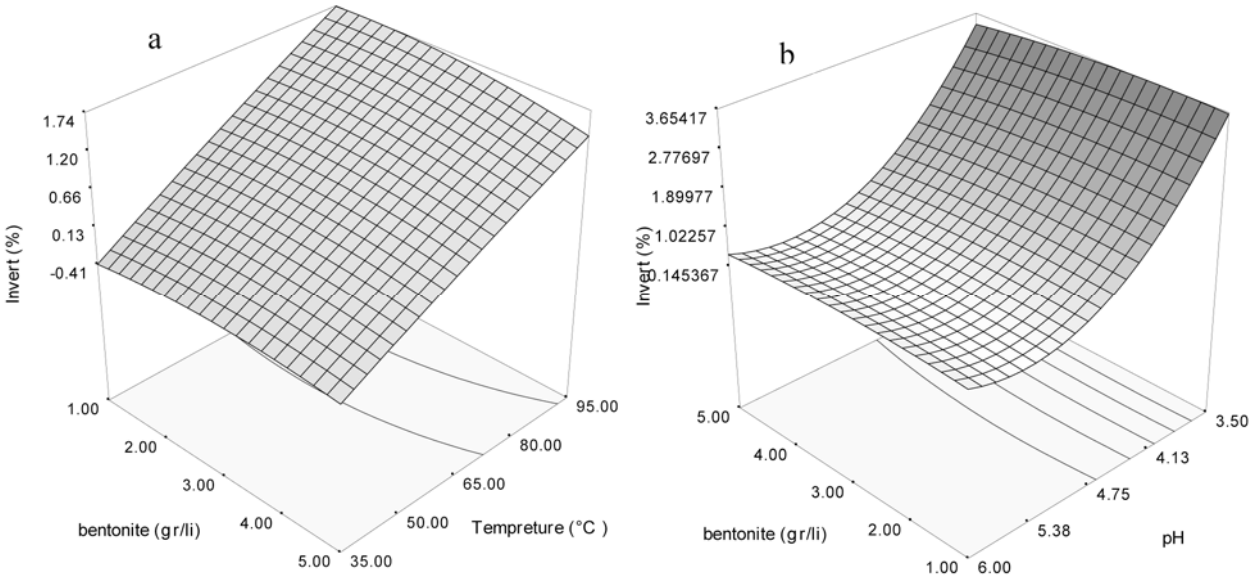
شکل ٤- نمودار سطح پاسخ برای اثر (a) مقدار بنتونیت و pH (٦٥ ˚C =دما) و (b) درجه حرارت و pH (٣ gr/li= بنتونیت) بر خاکستر شربت تصفیه شده با بنتونیت

لازم به ذکر است که گر چه میزان ساکارز کاهش می‌یابد ولی میزان افزایش انورت نسبت به کاهش ساکارز بیشتر است. دلیل این امر احتمالا به این خاطر است که از هیدرولیز هر مولکول ساکارز دو مولکول گلوکز و فروکتوز حاصل می‌شود، در نتیجه در مجموع منجر به افزایش درجه خلوص اصلاح شده می‌شود. تاثیر بنتونیت بر تغییرات درجه خلوص خطی بود. مقدار بنتونیت در مقادیر پایین تر باعث افزایش درجه خلوص اصلاح شده در شربت شد ولی با افزایش بیشتر آن، درجه خلوص شربت کاهش یافت (شکل ۵). بنتونیت در مقادیر پایین‌تر با حذف عوامل ایجاد رنگ، کدورت و خاکستر باعث کاهش بریکس شربت و افزایش درجه خلوص اصلاح شده می شود. دلیل کاهش درجه خلوص شربت با افزایش مقدار بنتونیت احتمالا به این خاطر است که بنتونیت در غلظت های بالاتر باعث افزایش ناخالصی در شربت می شود و همان طور که قبلا ذکر شد خود به عنوان عامل ایجاد رنگ و کدورت عمل می کند.



شکل ٥- نمودار سطح پاسخ برای اثر (a) مقدار بنتونیت و pH (٦٥ ˚C =دما) و (b) درجه حرارت و pH (٣ gr/li= بنتونیت) بر درجه خلوص اصلاح شده شربت تصفیه شده با بنتونیت

۵- قند انورت: روند تغییرات درصد قندانورت شربت در روش تصفیه با بنتونیت با متغیرهای pH ، غلظت بنتونیت و درجه حرارت واکنش در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل های سه بعدی رویه پاسخ، عدم تاثیر غلظت بنتونیت ($P > ۰/۰۵$) بر روی تغییرات قند انورت مشاهده می شود (جدول۱). به طوری‌که با تغییر سطوح این متغیر میزان تغییرات قند انورت شربت بسیار ناچیز بود (شکل a-۶ وb-۶). از ضرایب مدل برازش شده بر داده های قند انورت چنین بر می‌آید که تغییرات قند انورت با دما بدون ارتباط با سایر متغیرها، یک روند خطی ($P < ۰/۰۰۰۱$) را دنبال می کند (جدول۱). با افزایش دما، در تمامی سطوح متغیرهای دیگر، قند انورت شربت افزایش یافت (شکلa-۶). دلیل این امر این است که با افزایش دما شدت هیدرولیز ساکارز موجود در شربت بیشتر بوده، لذا میزان قند انورت به مراتب بالاتر بوده است. در رابطه با نحوه تاثیرگذاری pH بر میزان قند انورت بایستی اشاره شود که تاثیر های خطی ($P < ۰/۰۰۰۱$)، درجه دوم ($P < ۰/۰۵$) وبرهم کنش pH با دما ($P < ۰/۰۵$) معنی‌دار بودند (جدول۱) بنابراین می توان چنین نتیجه‌گیری نمود که در شکل رویه پاسخ آن انحنا (غیر خطی) وجود دارد (شکلb-۶). همان طور که مشاهده می شود با کاهش pH درصد قند انورت شربت افزایش یافته است. از نظر شیمیایی ساکارز تا اندازه ای ناپایدار است و به آسانی به خصوص در محلول های اسیدی با آب ترکیب شده و به گلوکز و فروکتوز هیدرولیز می‌شود. در pH= ۸-۹ میزان تجزیه ساکارز در کمترین مقدار خود می‌باشد و تخمین زده می‌شود که به ازاء یک واحد کاهش در pH یا ۱۰°C افزایش دما هیدرولیز ساکارز ۳ برابر می‌شود (۶). لازم به ذکر است در صنعت استخراج قند از چغندر یا نیشکر تنها ساکارز اهمیت دارد، اما چون هدف از انجام این تحقیق تصفیه شربت خام چغندر با بنتونیت جهت تولید قند مایع انورته است که در صنایع تولید قند مایع انورته، انورسیون ساکارز نه تنها مانند صنعت قند واکنشی نامطلوب نیست، بلکه هدف تولید آن در مقادیر متفاوت برای تولید محصولات متنوع برای مصرف در صنایع مختلف می‌باشد.



شکل ٦- نمودار سطح پاسخ برای اثر (a) درجه حرارت و بنتونیت (pH= ٤/٧٥) و (b) pH و بنتونیت (٦٥ °C =دما) برمیزان قند انورت شربت تصفیه شده با بنتونیت

بهینه سازی[1]: شرایط بهینه برای تصفیه شربت خام چغندرقند با استفاده از بنتونیت، pH ها و دماهای مختلف بر روی پارامترهای رنگ، کدورت، خاکستر، درجه خلوص اصلاح شده و قند انورت شربت با استفاده از بهینه‌یابی عددی نرم افزار Design Expert تعیین شد. برای این منظور رنگ، کدورت و خاکستر در حداقل و درجه خلوص اصلاح شده و قندانورت در حداکثر مقدار خود در نظر گرفته شدند. در حالت بهینه بیشترین مقدار برای قند انورت و درجه خلوص اصلاح شده به ترتیب ۱/۸۴ درصد نسبت به بریکس شربت و ۹۴/۸ درصد و کمترین مقدار برای رنگ، کدورت و خاکستر به ترتیب ۱۶۲۸ ($ICU_{۴۲۰}$)، ۵/۶ (NTU) و ۰/۵۵ درصد به دست آمد. مقادیر متغیرهای مستقل در شرایط بهینه تصفیه شربت برای غلظت بنتونیت، pH و درجه حرارت به ترتیب شامل ۱/۲۱gr/li، ۴/۶۴ و ۹۳/۸۰ °C

1- Optimization

به دست آمد.

البته استفاده از دماهای بالا به دلیل نیاز به انرژی بالاتر و احتمال تجزیه بیشتر قندهای انورت و در نتیجه تولید رنگ اضافی (هر چند این رنگ اضافی توسط بنتونیت جذب می شود) و ترکیبات جانبی مانند HMF و هم چنین کاهش راندمان تولید قند انورت که محصول نهایی و مطلوب حاصل از این تصفیه می‌باشد، توصیه نمی شود، لذا در عمل استفاده از دماهای ۷۵°C–۶۵ مطلوب می‌باشد. بدین منظور فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از این دما صورت گرفت. این شرایط بهینه در جدول ۲ فهرست شده است که نشان می‌دهد جهت حصول نقطه بهینه در شرایط جدید نیاز به دمای ۷۵°C، pH=۴/۴۷ ، و غلظت بنتونیت ۱/۷ گرم بر لیتر می‌باشد. شربت خام تصفیه‌شده با این شرایط دارای حداقل مقدار رنگ (ICU_{420} ۱۶۶۴)، کدورت (NTU ۶/۳)، خاکستر (۰/۵۵ درصد) و حداکثر مقدار قند انورت (۱/۶ درصد) و درجه خلوص اصلاح شده (۹۳/۹ درصد) بود.

جدول۲- مقادیر بهینه پیشگویی شده متغیرهای مستقل فرآیند تصفیه شربت شامل بنتونیت، pH ودما

متغیر مستقل	حداقل	حداکثر	مقدار بهینه
بنتونیت (gr/li)	۱	۵	۱/۷
دما (C)	۳۵	۷۵	۷۵
pH	۳/۵	۶	۴/۴۷

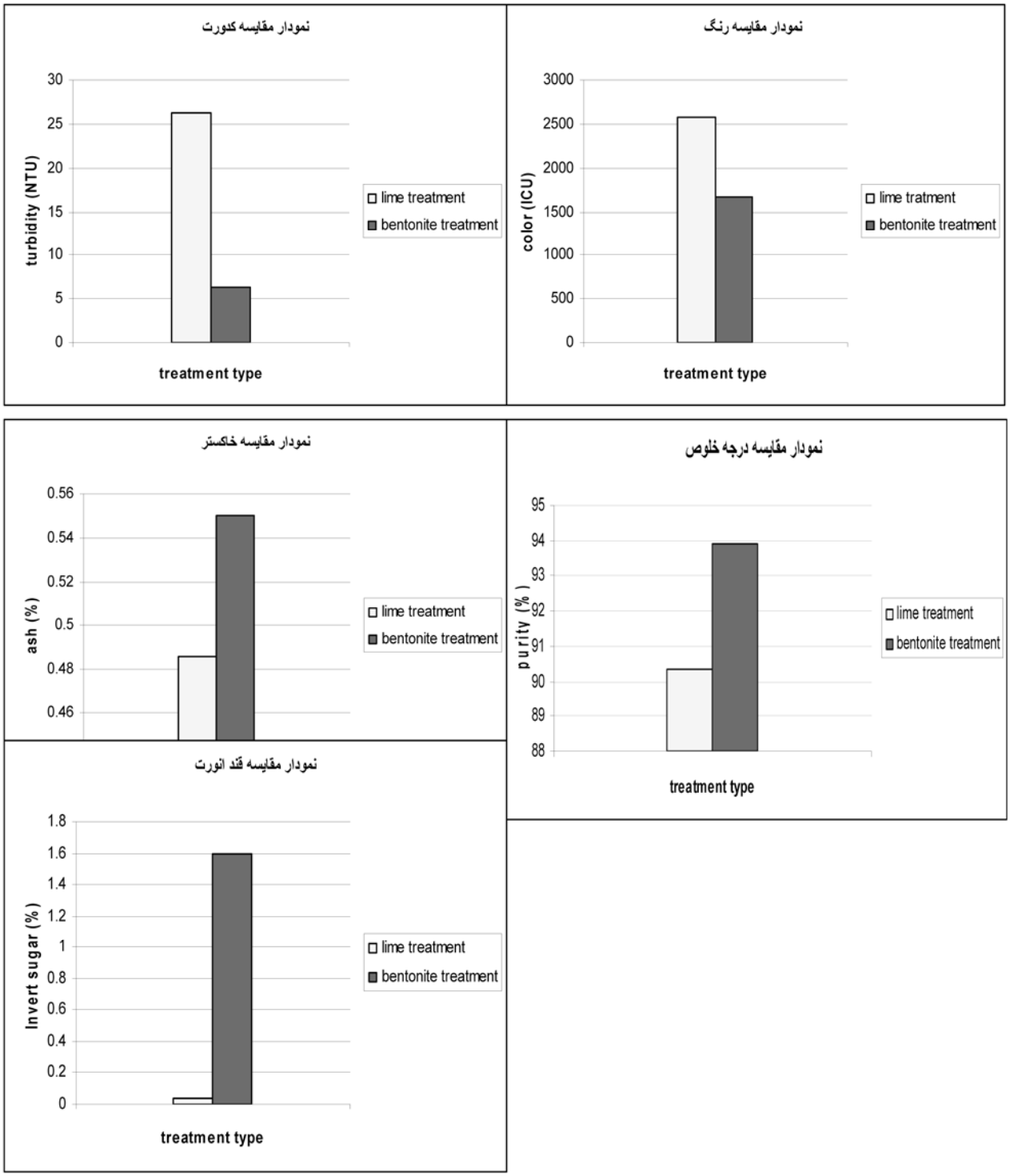
مقایسه نقطه بهینه به دست آمده با روش بنتونیت با روش تصفیه کلاسیکی شربت خام چغندرقند: مقایسه میانگین پارامترهای رنگ، کدورت، خاکستر، درجه خلوص و قند انورت بین دو روش تصفیه با بنتونیت و تصفیه کلاسیک، در سطح احتمال ۹۵ درصد بررسی شد. در شرایط این پژوهش میانگین میزان رنگ شربت در این دو روش از نظر آماری متفاوت بود ($P<۰/۰۱$) و بنتونیت به مقدار بیشتری رنگ شربت را کاهش داد (شکل۷، الف). اختلاف معنی‌داری نیز بین کدورت شربت در دو روش تصفیه وجود داشت ($P<۰/۰۱$) به طوری‌که میزان کدورت در روش تصفیه با بنتونیت نسبت به روش تصفیه کلاسیکی بسیارکمتر بود (شکل۷، ب). میانگین درجه خلوص شربت تصفیه شده با روش آهک زنی- کربناسیون با درجه خلوص اصلاح شده با استفاده از بنتونیت در نقطه بهینه متفاوت بود ($P<۰/۰۵$) به طوری‌که درجه خلوص اصلاح شده بالاتر به دست آمد (شکل ۷، پ). میزان کاهش خاکستر شربت در روش کلاسیک نسبت به بنتونیت بهتر بود و روش کلاسیک میزان خاکستر را بیشتر کاهش داد، ولی از نظر آماری تفاوت معنی‌داری بین این دو روش از نظر میزان کاهش خاکستر وجود نداشت (شکل۷، ت). همان طورکه قبلا ذکر شد بنتونیت از نظر جداسازی خاکستر در pH های بالا تر بهتر عمل می‌کند، در حالی که جداسازی عوامل ایجاد رنگ و کدورت در pH های پایین تر بهتر صورت می‌گیرد. میانگین قند انورت نیز دراین دو روش از نظر آماری متفاوت بود ($P<۰/۰۰۱$) و در روش تصفیه با بنتونیت نسبت به تصفیه کلاسیک بسیار بالاتر بود (شکل۷، ث). دلیل این امر این است که در تصفیه کلاسیکی در آهک خور دوم در دما و قلیائیت بالا قند انورت تجزیه شده و به اسید و رنگ تبدیل می‌شود در حالی که در روش تصفیه با بنتونیت به دلیل pH پایین شرایط آزمایش، ساکارز تجزیه شده و میزان قند انورت افزایش می‌یابد که با هدف عنوان شده در این تحقیق مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که متغیرهای فرآیند شامل غلظت بنتونیت، pH و دما از نظر آماری تاثیر معنی‌داری بر روی تصفیه شربت خام چغندرقند داشتند. مدل چند جمله‌ای درجه دوم برای پیش بینی میزان رنگ، کدورت، خاکستر، درجه خلوص اصلاح شده و قند انورت به دست آمد. با افزایش غلظت بنتونیت میزان کدورت افزایش و میزان درجه خلوص اصلاح شده کاهش یافت، در حالی که این متغیر تاثیر معنی‌داری بر سایر پارامتر ها نداشت. در pH های پایین تر جداسازی عوامل ایجاد کننده رنگ و کدورت توسط بنتونیت افزایش یافت که منجر به افزایش درجه خلوص اصلاح شده گردید، ولی جداسازی خاکستر کاهش و میزان قند انورت نیز افزایش یافت. با افزایش دما از ۳۵ °C به ۹۵ °C حذف عوامل ایجاد کننده رنگ و کدورت روند افزایشی داشت و میزان قند انورت نیز افزایش یافت که منجر به افزایش درجه خلوص گردید، در حالی که این متغیر تاثیر معنی‌داری بر میزان خاکستر شربت نداشت. شرایط بهینه تصفیه برای به حداقل رساندن میزان رنگ، کدورت و خاکستر شربت و هم چنین به حداکثر رساندن میزان درجه خلوص اصلاح شده و قند انورت از نظر غلظت بنتونیت، pH و دما به ترتیب ۱/۷ gr/li، ۴/۴۷ و۷۵ °C به دست آمد. این پژوهش می تواند مقدمه ای برای تحقیقات بعدی در زمینه تولید قند مایع انورته از چغندرقند و نیشکر برای صنایع مصرف کننده از جمله صنایع نوشابه و کنسروسازی باشد. به طوری‌که بدون نیاز به تولید کریستال‌های شکر و حل کردن مجدد آن، بتوان به طور مستقیم قند مایع این صنایع را تولید کرد.

قدر دانی

از ریاست محترم کارخانه قند شیرین خراسان جناب آقای مهندس قربانعلی قربانی و تمام اعضاء پرسنل محترم آزمایشگاه کارخانه به ویژه خانم مهندس مینو قوام نصیری (مدیر کنترل کیفی کارخانه قند شیرین خراسان) که در انجام آزمایش‌ها ما را یاری فرموده اند، کمال تشکر را داریم.



شکل ۷- مقایسه پارامترهای (الف) رنگ، (ب) کدورت (پ) درجه خلوص، (ت) خاکستر و (ث) قند انورت بین دو روش تصفیه با بنتونیت و کلاسیک (آهک و CO_2)

منابع

اکشی، ع.، ۱۳۷۸، شفاف‌سازی آبمیوه، (ترجمه میرخلیل پیروزی فرد)، انتشارات جهاد دانشگاهی ارومیه، ۸۱-۷۴ .

سیلین، پ . م.، ۱۳۶۳، تکنولوژی تولید شکر از چغندرقند و تصفیه شکر، جلد اول (ترجمه مهندس محمد باقر پورسید، مهندس اکبر سجادی)، انتشارات سندیکای کارخانجات قند و شکر ایران.

شیخ الاسلامی، ر.، ۱۳۷۶، روشهای آزمایشگاهی و کاربرد آنها در کنترل فرایند صنایع غذایی (قند)، نشر مرسا، تهران.

فرمانی، ب.، حدادخداپرست، م. ح.، حصاری، ج و رضایی، ع.، ۱۳۸۴، تصفیه شربت خام نیشکر با بنتونیت ۱ -تعیین مقداربهینه بنتونیت و pH، مجله علوم و صنایع غذایی ایران، دانشگاه تربیت مدرس، دوره ۲، شماره ۴، ۹-۱.

فرمانی، ب.، حدادخداپرست، م. ح.، حصاری، ج و رضایی، ع.، ۱۳۸۵، تصفیه شربت خام نیشکر با بنتونیت ۲ -تعیین مقدار بهینه ژلاتین، زمان و دمای فرآوری با بنتونیت، مجله پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، ۷۵-۶۳.

مک گینس، ر.،۱۳۸۷، تکنولوژی چغندرقند، جلد اول (ترجمه مسعود فلاحی، محمد باقر باقرزاده، رضا شیخ الاسلامی)، انتشارات مرکز بررسی و تحقیق و آموزش صنایع قند ایران،۷۴-۵۹

Altin, O., Ozbelge, O. H., Dogu, T., 1999, Effect of pH, flow rate and concentration on the sorption of Pb and Cd on montmorillonite: I. Experimental. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 74 , 1131–1138.

Alvarez-Ayuso, E., Garcia-Sanchez, A ., 2003, Removal of heavy metals from waste waters by natural and Na-exchanged bentonites. Clays Clay Mineral, 51 (5), 475–480.

Anonymous.,1982, Grading manual for canned apple juice. United states department of agriculture, processed products branch.

Babel, S., Kurniawan, T. A., 2003, Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water, a review. Journal of Hazardous Materials, B 97, 219–243.

Didi , M. A., Makhoukhi, B., Azzouz, A., Villemin, D., 2009, Colza oil bleaching through optimized acid activation of bentonite, A comparative study. Applied Clay Science, 42 , 336–344.

Erdogan, B., Demirci, S., Akay, Y., 1996, Treatment of sugar beet juice with bentonite, sepiolite, diatomite and quartamin to remove color and turbidity. Applied Clay Science, 11, 55-67.

Gokmen, V., Serpen, A., 2002, Equilibrium and kinetic studies on the adsorption of dark colored compounds from apple juice using adsorbent resin . Journal of Food Engineering, 53, 221–227.

Kaya, A., Oren, A. H., 2005, Adsorption of zinc from aqueous solutions to bentonite. Journal of Hazardous Materials, B 125 , 183–189.

Khalid, N., Ahmad, S., Kiani, S. N., Ahmed, J., 1999, Removal of mercury from aqueous solutions by adsorption to rice husks. Separation Science and Technology, 34 (16), 3139–3153.

Koocheki, A., Taherian, A. R., Razavi, S. M. A., Bostan, A., 2009, Response surface methodology for optimization of extraction yield, viscosity, hue and emulsion stability of mucilage extracted from Lepidium perfoliatum seeds. Food Hydrocolloids, 23 , 2369–2379

Koyuncu, H., Kul, A. R., Calimli, A., Yildiz, N., Ceylan, H., 2007, Adsorption of dark compounds with bentonites in apple juice. LWT, 40 , 489–497.

Li, Q., Yan Yue, Q., Jian Sun, H., Su, Y., Yu Gao, B., 2010, A comparative study on the properties, mechanisms and process designs for the adsorption of non-ionic or anionic dyes onto cationic-polymer/bentonite. Journal of Environmental Management, 91, 1601-1611.

Mohammed A. Al-Anber., 2010, Removal of high-level Fe^{3+} from aqueous solution using natural inorganic materials:Bentonite (NB) and quartz (NQ). Desalination, 250 , 885–891.

Ozcan, A., Omeroglu, C., Erdogan, Y., Ozcan, A. S., 2007, Modification of bentonite with a cationic surfactant: an adsorption study of textile dye Reactive Blue 19. Journal of Hazardous Materials, 140, 173–179.

Rossi, M., Gianazza, M., Alamprese, C., Stanga, F., 2001, The effect of bleaching and pHysical refining on colour and minor components of palm oil. Journal of the American Oil Chemists' Society, 78, 1051-1055.

Shen, D, Fan, J., Zhou, W., Gao, B., Yue, Q., Kang, Q., 2009, Adsorption kinetics and isotherm of anionic dyes onto organo-bentonite from single and multisolute systems. Journal of Hazardous Materials, 172 , 99–107.

Zhansheng, W., Chun, L., Xifang, S., Xiaolin, X., Bin, D., Jin'e, L., Hongsheng, Z., 2006, Characterization, Acid Activation and Bleaching Performance of Bentonite from Xinjiang. Chinese J. Chem. Eng, 14 (2), 253-258.