

ارزیابی خواص عملکردی موسیلاژ دانه به استخراج شده به کمک فراصوت

عاطفه فرمند^۱، مهدی وریدی^{۲*}، آرش کوچکی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۸/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۴/۱۳

چکیده

موسیلاژ دانه به از جمله هیدروکلوئیدهای بومی است که استخراج آن به علت ویسکوزیته بالا نیازمند روشی است که علاوه بر کاهش زمان و مصرف انرژی، از بازدهی بالایی نیز برخوردار باشد. استخراج به کمک فراصوت به عنوان یکی از روش‌های نوین می‌تواند در دستیابی به این هدف نقش داشته باشد. به این منظور در ابتدا شرایط استخراج رایج (زمان ۴۵ دقیقه، دمای ۴۷°C و نسبت آب به دانه ۱:۳۲/۵)، با هدف تعیین بهترین شرایط هیدراسیون بهینه‌سازی گردید. در این پژوهش از فراصوت (پروپ با فرکانس ۲۴KHz و توان ۴۰۰W) با شدت‌ها (۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ درصد) و زمان‌های مختلف صوت‌دهی (۵، ۱۵ و ۳۰ دقیقه) استفاده شد. نتایج حاکی از آن بود که طی ۳۰ دقیقه استخراج با شدت ۱۰۰ درصد، بازده نسبت به نمونه کنترل ۴۲/۷ درصد افزایش داشت. مدل هرشل بالکی بهترین مدل رئولوژیکی برای توصیف رفتار جریان نمونه‌ها انتخاب شد. به علت شکست ساختار پلی‌ساکاریدی موسیلاژ توسط امواج فراصوت، حلالیت نمونه‌ها بین ۶۶ تا ۹۲ درصد متغیر بود اما در مقایسه با نمونه کنترل به شدت افزایش یافت. در شدت ۶۰ درصد نیز بالاترین پایداری نمونه‌ها مشاهده شد. پایداری کف نمونه‌ها نسبت به نمونه کنترل ۱۷/۳۱ درصد افزایش نشان داد. با وجود کاهش جذب آب موسیلاژهای استخراج شده طی زمان طولانی با شدت بالا، اما این پارامتر تقریباً در بسیاری از تیمارها فراتر از نمونه کنترل بود. نتایج این پژوهش نشان داد استفاده از فراصوت به دلیل تاثیر مثبت بر بسیاری از خواص عملکردی می‌تواند روش مناسبی برای استخراج موسیلاژ دانه به معرفی گردد.

واژه‌های کلیدی: استخراج، خواص عملکردی، فراصوت، موسیلاژ دانه به

مقدمه

به^۴ بومی مناطق مرکزی آسیا بوده و به میزان زیاد در شمال ایران یافت می‌گردد. ایران پس از ترکیه و چین به‌عنوان سومین تولیدکننده این میوه در جهان محسوب می‌گردد (Badenes & Byrne, 2012). هر میوه دارای پنج برچه است و هر کدام از برچه‌ها دارای ۱۵-۶ دانه می‌باشند. دانه‌ها قهوه‌ای رنگ بوده و طول آنها بطور میانگین ۶ mm می‌باشد. کاربرد اصلی دانه‌ها به دلیل موسیلاژی است که سطح خارجی آنها را احاطه کرده است. موسیلاژ دانه به، کمپلکسی از بخش‌های سلولزی با پلی‌ساکاریدهای قابل هیدرولیز می‌باشد. هیدرولیز ملایم این موسیلاژ با اسید باعث تولید سلولز، L-آرابینوز و مخلوط اسید آلدوبیورونیک می‌گردد اما در

نتیجه‌ی هیدرولیز بیشتر، گلوکز، گالاکتوز، آرابینوز، زایلوز و اسید هگزامتیک ایجاد می‌شود (Whistler & Bemiller, 1993). هیدروکلوئیدها بصورت گسترده در مواد غذایی با هدف ایجاد ژل، اصلاح بافت و پایدارکنندگی کاربرد دارند. پلی‌ساکاریدها به دلیل ساختار خطی، بزرگ و انعطاف‌پذیر خود حتی در غلظت‌های کم نیز می‌توانند باعث افزایش ویسکوزیته گردند (Vardhanabhuti & Ikeda, 2006). به دلیل ساختار منحصر به فرد موسیلاژ دانه به از جمله وجود نانوفیبریل‌های سلولزی ذخیره شده در اپیدرم دانه که به راحتی در آب پراکنده شده و دیسپرسیونی با ویسکوزیته بالا تشکیل می‌دهند، طی سال‌های اخیر این ترکیب مورد توجه محققان قرار گرفته است و در این خصوص پژوهش‌هایی در زمینه تولید فیلم خوراکی (Jouki et al., 2013)، پایدارکننده امولسیون (et al., 2014Ritzoulis)، کاربرد بعنوان جایگزین چربی (Nikoofar et al., 2013) و انکپسوله کردن روغن‌های ضروری (Jouki et al., 2014) انجام شده است. استخراج با آب گرم (استخراج رایج) عمده‌ترین روش مورد

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، استادیار و دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
* نویسنده مسئول: (Email: m.Varidi@um.ac.ir)

جداسازی کامل موسیلاژ، روش‌های مناسبی برای استخراج این موسیلاژ محسوب نمی‌شوند.

استخراج رایج برای جداسازی هیدروکلوئید دانه‌ها نیازمند بکارگیری نیروی برشی قوی و استفاده از همزن‌هایی با دور بالاست که این امر باعث ایجاد مخلوط غیریکنواخت دانه‌های شکسته و موسیلاژ می‌شود. استفاده از دور بالا طی عملیات همزدن به دلیل چسبندگی قوی میان لایه‌های موسیلاژی و سطح خارجی دانه ضروری بنظر می‌رسد اما می‌تواند ناخالصی‌های زیادی را به درون محلول هیدروکلوئیدی وارد کند (Farahnaky et al., 2013). از طرفی موسیلاژ دانه‌ی به از ویسکوزیته‌ی ظاهری و قوام‌دهندگی بالایی در میان هیدروکلوئیدهای بومی برخوردار است (Tomasik, 2004) که این موضوع محدودیت‌هایی را برای استفاده از آن در محلول‌های آبی ایجاد می‌کند، بطوری که اغلب به دلیل ایجاد محلول غلیظ و چسبنده امکان استخراج کامل موسیلاژ وجود ندارد. همچنین بمنظور صنعتی کردن فرآیند استخراج هیدروکلوئیدها، استفاده از روشی با بازدهی بالا از اهمیت بسیاری برخوردار است. لذا بررسی استخراج این موسیلاژ به کمک فراصوت امری ضروری به نظر می‌رسد.

بر اساس بررسی منابع، در پژوهش‌های محدود انجام شده در زمینه استخراج موسیلاژ با استفاده از فراصوت، خواص فیزیکوشیمیایی و رئولوژیکی موسیلاژ استخراج شده، مورد ارزیابی قرار گرفته و خواص عملکردی بعنوان فاکتور کلیدی در تولید فرآورده‌های غذایی مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا هدف از این پژوهش در ابتدا، بهینه‌سازی شرایط استخراج به روش معمولی با هدف رسیدن به حداکثر راندمان و سپس ترکیب فراصوت با روش معمولی و بررسی برخی خواص عملکردی موسیلاژ استخراج شده نظیر پایداری امولسیون در برابر حرارت، قابلیت جذب آب، پایداری کف، حلالیت و ویسکوزیته ظاهری می‌باشد. متغیرهای فرآیند شامل شدت‌های متفاوت فراصوت (۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰٪) و زمان اعمال امواج (۳۰، ۱۵، ۵ دقیقه) بود.

مواد و روش

استخراج آبی (رایج) موسیلاژ دانه به

استخراج موسیلاژ دانه به، با استفاده از آب دوبار تقطیر به نسبت (۶۰:۱-۲۰:۱)، دمای °C ۸۵-۲۵ و زمان ۶۰-۱۰ دقیقه انجام شد. قبل از افزودن دانه‌ها، آب تا دمای مورد نظر گرم شد و سپس طی مدت استخراج، مخلوط آب و دانه با استفاده از همزن (شیمی فن، ایران) با سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه مخلوط گردید. سپس دانه‌ها به کمک قیف بوختر متصل به پمپ خلا از محلول هیدروکلوئیدی جدا شدند و با افزودن اتانل ۹۶ درصد (۳ برابر حجم) موسیلاژ رسوب کرد

استفاده بمنظور استخراج پلی‌ساکاریدها محسوب می‌گردد. هر چند روشی ساده و ایمن می‌باشد اما نیازمند بکارگیری دمای بالا و زمان طولانی است که منجر به تجزیه پلی‌ساکاریدها و تغییر ویژگی آن‌ها می‌گردد (Jiang et al., 2014). امروزه روش استخراج به کمک فراصوت بعنوان روشی ساده و باکارایی بالا برای پلی‌ساکاریدها در نظر گرفته می‌شود. از مهم‌ترین اثرات مکانیکی امواج فراصوت می‌توان به تشکیل میکروکانال‌ها^۱ اشاره کرد (Tsochatzidis et al., 2001) که در نتیجه‌ی پدیده کاویتاسیون در نزدیک سطح مواد جامد ایجاد می‌گردد. این اثر مکانیکی فراصوت می‌تواند از طریق تخریب دیواره سلولی و افزایش انتقال جرم محتویات سلول، باعث تسهیل خروج ترکیبات گیاهی گردد. استخراج به کمک فراصوت ضمن ساده بودن و کاهش مصرف انرژی و حلال، در زمان کوتاه کارایی بالایی نیز دارد. استفاده از فراصوت می‌تواند تغییراتی در ساختار و خواص پلی‌ساکاریدها ایجاد نماید (Wang et al., 2014). از طرفی خواص عملکردی پلی‌ساکاریدها با ساختار و وزن ملکولی آن‌ها در ارتباط است (Zhang et al., 2004).

Farahnaky و همکاران (۲۰۱۳-b) با استفاده از روش سطح پاسخ موسیلاژ دانه مرمرشک را استخراج کرده و از نظر روشنیایی رنگ، ترکیبات شیمیایی و ویژگی‌های رئولوژیکی با نمونه استخراج شده با روش رایج، مقایسه کردند. این محققان نشان دادند با افزایش شدت فراصوت، ضریب قوام کاهش و اندیس رفتار جریان افزایش یافت. Benito-Román و همکاران (۲۰۱۳) اثر شدت، زمان و سیکل امواج فراصوت را بر استخراج بتاگلوکان از جو به کمک روش سطح پاسخ بررسی کردند. نتایج نشان داد راندمان استخراج به زمان صوت‌دهی و شدت امواج وابسته بود. اثر تیمار فراصوت بر ویژگی‌های رئولوژیکی و اندازه ذرات دیسپرسیون سه نوع صمغ کتیرای ایرانی توسط Farzi و همکاران (۲۰۱۱) ارزیابی شد. نتایج نشان داد با افزایش زمان اعمال فراصوت، ویسکوزیته و اندازه ذرات دیسپرسیون کاهش یافت. Fabre و همکاران (۲۰۱۴) از فراصوت برای استخراج موسیلاژ دانه کتان استفاده و آن را با نمونه‌های استخراج شده با روش رایج و میکروویو مقایسه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد وزن ملکولی پلی‌ساکاریدها به یک سوم میزان اولیه کاهش یافت. این درحالی بود که امواج فراصوت تاثیر بسیار کمی بر میزان پروتئین و منوساکاریدهای موسیلاژ داشت. این محققان نشان دادند پارامترهای سینتیک استخراج آبی از نوع درجه اول و روش فراصوت از نوع درجه دوم بود لذا به علت سرعت بالای استخراج با فراصوت، طی ۳۰ دقیقه استخراج بصورت کامل انجام شد. از طرفی در این پژوهش مشخص گردید میکروویو به دلیل اتلاف قابل توجه انرژی برای گرم کردن آب و روش استخراج آبی به دلیل طولانی بودن زمان استخراج برای

(۲) $f_{ev} = (f_{ev} / i_{ev}) \times 100$ = پایداری امولسیون (درصد)
 که f_{ev} حجم نهایی امولسیون و i_{ev} حجم اولیه امولسیون می‌باشد.

قابلیت جذب آب

۰/۰۵ گرم موسیلاژ درون لوله فالکون وزن گردید و سپس آب دوبار تقطیر تا جایی که نمونه بصورت کامل مرطوب گردد، افزوده شد (حدود ۱۰ ml). در ادامه لوله‌ها به مدت ۱۰ دقیقه با دور ۱۶۰۰ سانتریفوژ شدند. آب اضافی موجود در لوله‌ها خارج و ماده باقی‌مانده وزن گردید. قابلیت جذب آب بر اساس فرمول زیر محاسبه گردید (Sciarini et al., 2008):

(۳) $SSW = (SSW - SW) / SW$ = قابلیت جذب آب (g/g)
 که SSW وزن ماده آب جذب کرده و SW وزن نمونه است.

پایداری کف

بمنظور کامل شدن جذب آب، محلول‌های موسیلاژ دانه به (۲۵/۰ درصد وزنی - حجمی) به مدت یک شب در دمای $4^{\circ}C$ نگهداری شدند. سپس پودر سفیده تخم مرغ (۲ درصد وزنی - حجمی) به محلول افزوده و با استفاده از هموژنایزر طی ۲ دقیقه با دور rpm ۸۶۰۰ به کف تبدیل گردید. کاهش حجم کف پس از ۳۰ دقیقه بر اساس رابطه زیر بعنوان پایداری کف گزارش گردید (Cui et al., 1993; Sciarini et al., 2008):

(۴) $f_{fv} = (f_{fv} / t_{sv}) \times 100$ = پایداری کف (درصد)
 که f_{fv} حجم کف پس از ۳۰ دقیقه و t_{sv} حجم کل سوسپانسیون می‌باشد.

حلالیت

۲۰ میلی لیتر از سوسپانسیون (۵/۰ درصد وزنی - حجمی) موسیلاژ دانه به مدت ۳۰ دقیقه با کمک شیکر (۱۵۰ دور در دقیقه) در دمای $25^{\circ}C$ همزده شد. سپس سوسپانسیون‌ها طی ۱۵ دقیقه با دور $800 \times g$ سانتریفوژ شد. ۱۰ میلی لیتر از محلول بالایی سوسپانسیون سانتریفوژ شده با استفاده از پیپت به پلیت منتقل شد و در آن با دمای $100^{\circ}C$ تا رسیدن به وزن ثابت خشک گردید. حلالیت از طریق رابطه (۵) محاسبه شد (López-Franco et al., 2013):

(۵) $w_f = [(w_f \times 20) / (w_i \times 10)] \times 100$ = حلالیت (درصد)

که w_f میزان موسیلاژ بازیابی شده از محلول و w_i وزن موسیلاژ مورد استفاده برای تهیه سوسپانسیون می‌باشد.

بررسی رفتار جریان و مدل‌سازی رئولوژیکی

محلول‌های موسیلاژ دانه به (۱/۰ درصد وزنی - حجمی) بمنظور کامل شدن فرآیند جذب آب به مدت یک شب در دمای $4^{\circ}C$

(Singthong et al., 2009). در ادامه موسیلاژ حاصل در آن با دمای $50^{\circ}C$ خشک گردید. اندازه‌گیری راندمان استخراج، بر اساس وزن اولیه دانه محاسبه گردید (Koocheki et al., 2010). موسیلاژ تهیه شده در شرایط بهینه بعنوان نمونه کنترل در نظر گرفته شد.

استخراج به کمک فراصوت

در این مرحله، دانه‌های هیدراته شده (مطابق با دما و نسبت آب به دانه تعیین شده در شرایط بهینه استخراج رایج) در معرض امواج مستقیم فراصوت (سونوتروود) با شدت (۶۰ و ۲۰٪) توان اسمی و زمان (۳۰ و ۱۵ دقیقه) قرار گرفتند. زمان اعمال فراصوت از زمان تعیین شده در شرایط بهینه کسر گردید. دستگاه فراصوت (هیلسچر، مدل یو پی ۴۰۰ اس، آلمان) دارای فرکانس ۲۴ کیلوهرتز و توان ۴۰۰ وات بود. در این آزمون از سونوتروود مدل اچ ۲۲ استفاده شد و فاصله سونوتروود از سطح بشر حاوی محلول هیدروکلئیدی برابر ۲۵ mm بود. بمنظور جلوگیری از افزایش ناگهانی دما، بشر حاوی نمونه در داخل ظرف عایق دارای یخ قرار گرفته بود و دما هر یک دقیقه کنترل شد. پس از اعمال فراصوت، جداسازی دانه‌ها از محلول، با استفاده از پارچه‌ی توری چند لایه و قیف بوخنر متصل به پمپ خلا، انجام گردید. پس از ترسیب موسیلاژ با اتانل ۹۶ درصد (۳ برابر حجم)، در آن با دمای $50^{\circ}C$ خشک گردید. راندمان مطابق با روش ذکر شده در قسمت ۱-۲ اندازه‌گیری شد. موسیلاژ خشک شده پس از آسیاب، از الک مش ۱۸ عبور داده شده و بمنظور انجام آزمایشات بعدی، در ظروف پلاستیکی و در جای خنک نگهداری شد.

پایداری امولسیون در برابر حرارت

پایداری امولسیون در برابر حرارت بر اساس روش Sciarini و همکاران (۲۰۰۸) و اصلاحات انجام شده توسط کوچکی و همکاران (۲۰۰۹-a) تعیین گردید. محلول ۰/۰۵ درصد از هر نمونه موسیلاژ با استفاده از همزن مغناطیسی طی ۳۰ دقیقه و در دمای اتاق تهیه گردید. دیسپرسیون حاصل قبل از استفاده در تهیه امولسیون و با هدف کامل شدن جذب آب، به مدت یک شب در دمای $4^{\circ}C$ قرار گرفت. سپس امولسیون روغن در آب (نسبت روغن: آب، ۲۰:۸۰ حجمی - حجمی) از طریق افزودن روغن آفتابگردان به محلول هیدروکلئیدی و همزدن توسط میکسر طی ۱۰ دقیقه و با دور rpm ۱۰۰۰ آماده گردید. در ادامه امولسیون به کمک هموژنایزر اولتراتوراکس تی-۲۵ (آی کی ای، آلمان) در rpm ۹۶۰۰ به مدت ۱ دقیقه هموژن گردید. بمنظور تعیین پایداری امولسیون در برابر حرارت، نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب با دمای $80^{\circ}C$ قرار گرفتند و در نهایت به مدت ۱۰ دقیقه با دور ۱۲۰۰g سانتریفوژ (اپندورف، مدل ۵۴۳۰ آلمان) شدند. پایداری امولسیون بر اساس فرمول زیر محاسبه گردید:

استفاده از آزمون توکی و نرم افزار Minitab (نسخه ۱۶) انجام شد. کلیه آزمون‌ها حداقل با ۲ تکرار انجام شد.

بحث و نتایج

بهبودسازی استخراج بمنظور تعیین بهترین شرایط هیدراسیون دانه‌ها

جدول ۱ نتایج آنالیز واریانس بازده استخراج را نشان می‌دهد. بمنظور بررسی ارتباط میان پارامترهای استخراج و راندمان، آنالیز رگرسیون چندگانه انجام گردید و نتایج نشان داد مدل چند جمله‌ای درجه دوم، قابلیت پیش‌بینی داده‌های آزمایشی را دارا بود. میزان ضریب تبیین (R^2) و ضریب تبیین اصلاح شده (R^2_{adj}) برای راندمان استخراج به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۷ تعیین گردید. بالا بودن ضریب تبیین نشان‌دهنده‌ی مطلوب بودن مدل در تعیین ارتباط میان متغیرها می‌باشد (Koocheki et al., 2009a). با مقایسه میان این دو پارامتر، تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد و این موضوع نشان می‌دهد که عبارت بی‌معنی در مدل وجود نداشته است. از طرفی عدم معنی‌داری ضعف برآزش، تاییدکننده دقت مدل در پیش‌بینی پاسخ بود. با توجه به مدل، اثر درجه دوم هر سه پارامتر معنی‌دار بود ($p < 0/0001$). علاوه بر این نتایج نشان داد دما و زمان بیشترین تاثیر را بر راندمان استخراج رایج داشت ($p < 0/0001$) در حالی که نسبت آب به دانه تاثیر کمتری داشت ($p < 0/0002$). بر اساس مجموع مربعات نیز، اهمیت متغیرهای مستقل بر راندمان استخراج شامل زمان < دما < نسبت آب به دانه بود. همچنین اثرات متقابل پارامترها معنی‌دار نبود. پس از حذف اثر عبارات بی‌معنی، معادله مدل برآزش داده شده بر راندمان استخراج به صورت زیر تعیین گردید:

$$-0/63A^2 - 1/26C^2 - 1/85B^2 - 0/51A + 1/14B + 1/62C - 9/8 = \text{راندمان (درصد)} \quad (10)$$

تغییرات راندمان با زمان استخراج و نسبت آب به دانه در دمای ثابت (55°C) در شکل ۱- الف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد با افزایش زمان از ۱۰ تا ۴۷/۵ دقیقه، راندمان استخراج نیز افزایش یافت. زمان استخراج به دلیل در معرض قرارگیری بیشتر دانه در حلال و با هدف نفوذ مایع به درون ماده خشک، حل شدن موسیلاژ و انتشار آن به درون محلول بر کارایی استخراج موثر می‌باشد (Ye & Jiang, 2011). گزارش شده است که زمان طولانی برای استخراج پلی‌ساکاریدها مناسبتر است (Hou & Chen, 2008). در نسبت‌های آب به دانه کمتر، زمان استخراج بر راندمان تاثیر بیشتری نشان داد و در نسبت آب به دانه ۶۰:۱ پس از ۴۷/۵ دقیقه، راندمان تقریباً به تعادل رسید، بطوری که افزایش زمان استخراج تاثیر معنی‌داری بر استخراج موسیلاژ نداشت. دلیل این موضوع جدا شدن کامل لایه‌های موسیلاژی روی دانه طی ۴۷/۵

نگهداری شدند. ویسکوزیته ظاهری با استفاده از ویسکومتر چرخشی (بروکفیلد، دی وی تری اولترا، آمریکا) اندازه‌گیری شد. سرعت برشی برنامه‌ریزی شده از ۲/۵۹ تا 35S^{-1} در دمای 25°C به نمونه‌ها اعمال شد. از چهار مدل مختلف (قانون توان^۱، هرشل بالکی^۲، بینگام^۳ و کسون^۴) بمنظور برآزش داده‌های سرعت برشی - تنش برشی استفاده گردید. مدل‌سازی داده‌ها و تعیین پارامترهای مربوط به هر مدل با استفاده از نرم‌افزار متلب (۲۰۰۹، نسخه ۷/۸) انجام شد.

مدل قانون توان:

$$\tau = k \gamma^n \quad (6)$$

مدل هرشل بالکی:

$$\tau = \tau_0 + k \gamma^n \quad (7)$$

مدل بینگام:

$$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma} \quad (8)$$

مدل کسون:

$$\tau^{0.5} = \tau_0^{0.5} + \eta\dot{\gamma}^{0.5} \quad (9)$$

که در این مدل‌ها τ تنش برشی (Pa)، $\dot{\gamma}$ سرعت برشی (S^{-1})، k ضریب قوام ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$)، τ_0 تنش اولیه (Pa)، n شاخص رفتار جریان و η ویسکوزیته پلاستیک (Pa.s) است.

تجزیه و تحلیل آماری

بمنظور مطالعه تاثیر شرایط استخراج رایج بر راندمان موسیلاژ، از روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی وجهی^۵ استفاده گردید. تیمارهای حاصل و سطوح آن‌ها در جدول ۱ ذکر شده است. بمنظور طراحی آزمایش و آنالیز نتایج از نرم افزار Design Expert نسخه (۸) استفاده گردید. بدین منظور معادلات ریاضی درجه دوم کامل با استفاده از آنالیز رگرسیون بر روی متغیر وابسته برآزش شدند. پس از ترسیم نمودار سطوح، بمنظور ارزیابی صحت مدل‌های برآزش یافته، آزمون ضعف برآزش^۶، ضریب تغییرات^۷، مقادیر R^2 (adj)، مدل P و ضرایب تعیین شدند. تایید کارایی بهترین فرمول ارائه شده توسط مدل نیز از طریق نتایج حاصل از آن با نتایج پیشگویی شده توسط مدل، مورد بررسی قرار گرفت.

طراحی آزمایشات استخراج به کمک فراصوت بصورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی صورت گرفت و مقایسه میانگین با

- 1 Power law
- 2 Herschel -Bulkley
- 3 Bingham
- 4 Casson
- 5 Face-Centered Central Composite Design (FCCCD)
- 6 Lack of fit
- 7 Coefficient of variation

بر اساس نمودارهای سطح- پاسخ، نمودارهای دوبعدی متقابل^۱ و نتایج آنالیز واریانس، شرایط بهینه استخراج با هدف استحصال حداکثر راندمان برابر نسبت آب به دانه (۱: ۳۲/۵)، دمای استخراج (۴۷°C) و زمان استخراج (۴۵ دقیقه) تعیین گردید. بر اساس نتایج این پژوهش، بیشترین میزان راندمان موسیلاژ در شرایط بهینه استخراج برابر ۱۰/۵۹٪ تعیین گردید که در مقایسه با راندمان هیدروکلوتیدهای استخراج شده در پژوهش های پیشین نظیر دانه *Durio Zibe* (Cui et al., ۲۰۰۷) ۱/۲٪، دانه کتان (۷/۹٪) (Amin et al., ۲۰۰۷)، دانه *thinus* (۴/۵۴٪) (Singtongh et al., ۲۰۰۹)، دانه شاهی (۶/۴۶٪) (Karazhyian et al., ۲۰۱۱) و دانه *Descurainia* (۱۰/۴۵٪) (Golalikhani et al., ۲۰۱۴) از راندمان بالاتری برخوردار بود.

Jouki و همکاران (۲۰۱۴) نیز استخراج رایج موسیلاژ دانه‌ی به را بهینه‌سازی کردند. در پژوهش مذکور، میزان راندمان، پروتئین، کدورت، ویسکوزیته، فعالیت آنتی‌اکسیدانی، پایداری امولسیون و پایداری کف بعنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شده بود و شرایط استخراج با سه متغیر دما، زمان و نسبت آب به دانه بهینه‌سازی شد. در این پژوهش زمان ۵ دقیقه، دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد و نسبت آب به دانه ۲۵/۱:۱ به عنوان شرایط بهینه گزارش شد که با توجه به ویسکوزیته بالایی که دانه‌ها در تماس با آب ایجاد می‌کردند، طی ۵ دقیقه استخراج عملاً موسیلاژ به طور کامل از دانه‌ها جدا نمی‌شد و راندمان مناسبی نیز حاصل نشد، لذا بهینه‌سازی استخراج این موسیلاژ مجدد انجام شد.

بررسی تاثیر استخراج به کمک فراصوت بر ویژگی‌های

موسیلاژ دانه به

راندمان استخراج

بر اساس نتایج آنالیز واریانس، اثر شدت و زمان صوت‌دهی طی استخراج، بر راندمان موسیلاژ با احتمال ۹۹ درصد معنی‌دار بود. راندمان نمونه کنترل (نمونه استخراج شده در شرایط بهینه و بدون اعمال فراصوت) برابر با $10/59 \pm 0/05$ درصد تعیین گردید. با مقایسه شدیدترین تیمار اعمال شده طی استخراج فراصوت با نمونه کنترل، افزایش ۴۲/۷ درصد در میزان راندمان موسیلاژ مشاهده شد. افزایش راندمان استخراج موسیلاژ به دلیل تخریب دیواره سلولی، تبدیل مواد غیر محلول به ترکیبات محلول در آب و یا آزاد شدن ترکیبات اتصال یافته نظیر پلی‌ساکارید- پروتئین یا پلی‌ساکارید- لیپیدها می‌باشد (Li et al., ۲۰۱۴).

دقیقه ابتدایی استخراج بوده است. چنین روندی نیز برای صمغ دانه کتان (Cui et al., ۱۹۹۴)، موسیلاژ *Opuntia spp.* (Sepulveda et al., ۲۰۰۸)، موسیلاژ دانه *Lepidiumperfoliatum* (Koocheki et al., ۲۰۰۹) و صمغ برگ یانانگ (Singthong et al., ۲۰۰۹) گزارش شده است.

نتایج نشان داد با افزایش مداوم نسبت آب به دانه، موسیلاژ بیشتری استخراج شد. بنظر می‌رسد حضور مقادیر بالاتر آب در اتصال بیشتر ترکیبات محلول در آب اندوسپرم دانه، موثر بوده و در نتیجه به افزایش راندمان کمک کرده است. بعبارت دیگر مقادیر فراوان آب باعث چسبندگی کمتر محلول هیدروکلوتیدی و در نتیجه استخراج بیشتر موسیلاژ شد. کوچکی و همکاران (۲۰۰۹-a) همچنین بیان کردند با افزایش نسبت آب به دانه، راندمان تصاعدی افزایش یافت. این محققان در دسترس قرارگیری بیشتر آب را علت اصلی افزایش نیروی لازم برای جداسازی موسیلاژ از دانه عنوان کردند. نتیجه‌ی مشابهی در ارتباط با اثر نسبت بالای آب به دانه بر افزایش راندمان موسیلاژ *Opuntia spp.* توسط Sepulveda و همکاران (۲۰۰۸) گزارش شد. اما در پژوهش های دیگر Singthong و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند در نسبت های کمتر آب به ماده جامد، صمغ یانانگ بیشتر استخراج می‌گردد. همچنین کاراژیان و همکاران (۲۰۱۱) اظهار کردند افزایش نسبت آب به دانه تا ۴۵:۱ به علت در دسترس قرارگیری بیشتر حلال و افزایش نیروی لازم برای انتقال جرم پلی‌ساکاریدها، منجر به افزایش راندمان گردید اما در ادامه با افزایش این نسبت تا ۶۰:۱ راندمان کاهش یافت.

همان‌طور که در شکل ۱-ب ملاحظه می‌گردد، با افزایش دما از ۲۵ تا ۸۵ درجه سانتی‌گراد، راندمان استخراج موسیلاژ نیز از ۷/۸۳ تا ۱۰/۰۹ درصد افزایش یافت. افزایش راندمان استخراج در دماهای بالا به دلیل افزایش حلالیت موسیلاژ موجود در اطراف دانه و هم‌چنین کاهش ویسکوزیته حلال می‌باشد که این امر به دلیل کاهش چسبندگی دانه‌ها، باعث بهبود انتقال موسیلاژ به درون فاز آبی می‌گردد (Koocheki et al., ۲۰۰۹). از طرفی استخراج در دماهای بالاتر منجر به افزایش سرعت انتقال جرم پلی‌ساکاریدهای محلول در آب می‌شود (Wu et al., ۲۰۰۷). محققان متعددی گزارش کردند که استفاده از دماهای بالا طی استخراج تاثیر قابل توجهی در افزایش راندمان ترکیبات هیدروکلوتیدی داشته است (Koocheki et al., ۲۰۰۹a؛ Li et al., ۲۰۰۷؛ Cui et al., ۱۹۹۴؛ Singthong et al., ۲۰۰۹؛ Bostan et al., ۲۰۱۰ و Golalikhani et al., ۲۰۱۴). شکل ۱-ج اثر متقابل دما و نسبت آب به دانه بر راندمان استخراج را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است دما تاثیر بیشتری بر راندمان استخراج داشت.

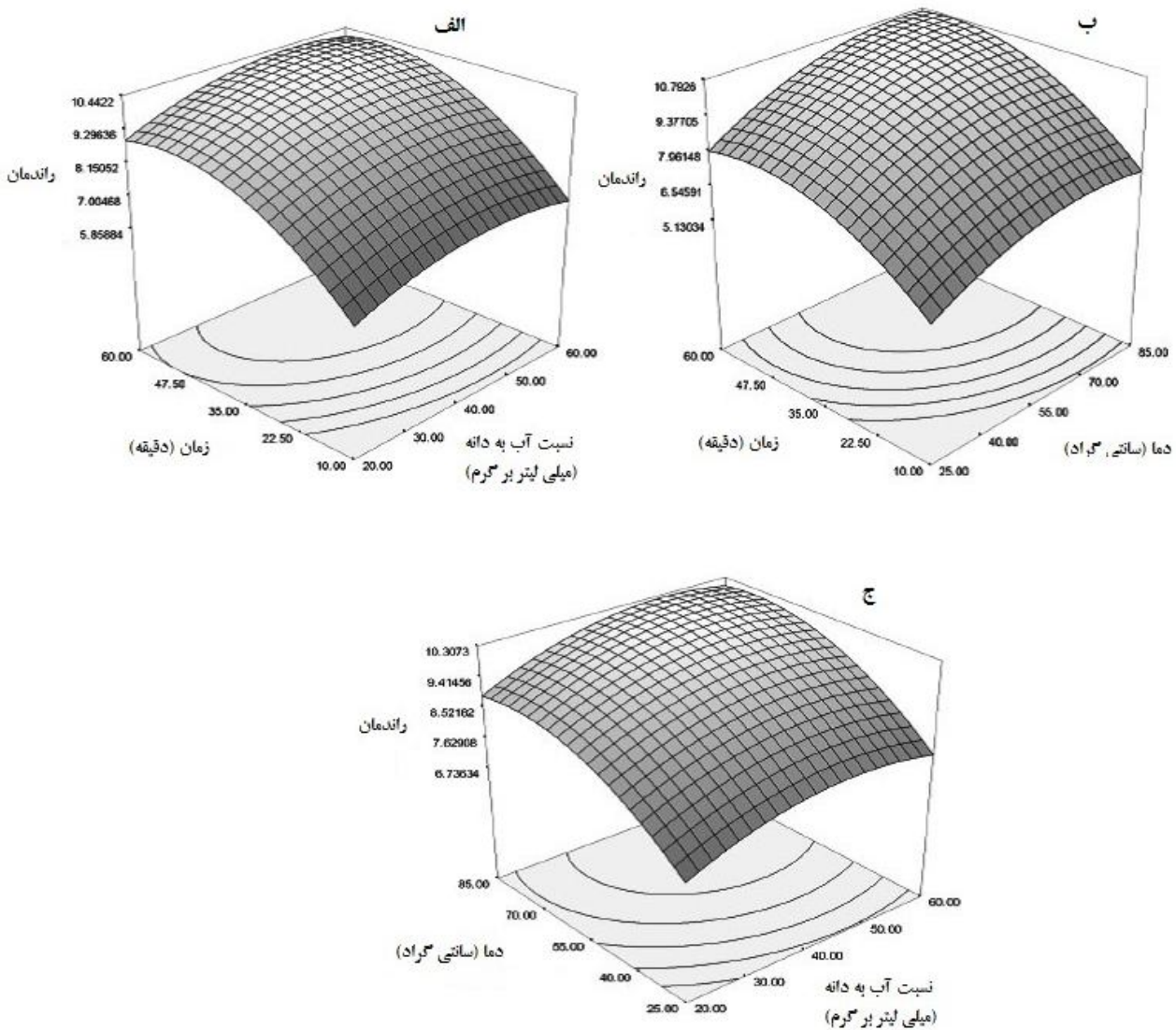
جدول ۱- نتایج طرح آزمایشی مورد استفاده در بهینه‌سازی استخراج رایج موسیلاژ دانه به

پاسخ		متغیر مستقل		
راندمان پیش بینی شده	راندمان واقعی	زمان (دقیقه)	دما (سانتی‌گراد)	نسبت آب به دانه (ml/g)
۹/۶۸	۹/۹۹	۳۵	۵۵	۶۰
۹/۸	۹/۴۶	۳۵	۵۵	۴۰
۵/۸۸	۵/۹۸	۱۰	۸۵	۲۰
۷/۸۶	۷/۶۷	۶۰	۲۵	۶۰
۹/۸	۹/۶۸	۳۵	۵۵	۴۰
۱۰/۰۹	۱۰/۳۹	۳۵	۸۵	۴۰
۹/۸	۹/۸۱	۳۵	۵۵	۴۰
۹/۸	۹/۳۷	۳۵	۵۵	۴۰
۶/۸۲	۶/۹۲	۶۰	۲۵	۲۰
۶/۹	۶/۷۳	۱۰	۸۵	۶۰
۴/۱۴	۴/۱	۱۰	۲۵	۲۰
۸/۶۵	۸/۶۷	۳۵	۵۵	۲۰
۱۰/۱۶	۱۰/۴۷	۶۰	۵۵	۴۰
۴/۸۶	۴/۹۶	۱۰	۲۵	۶۰
۹/۸	۹/۸۶	۳۵	۵۵	۴۰
۹/۸	۹/۹۷	۳۵	۵۵	۴۰
۱۰/۶۸	۱۰/۶۴	۶۰	۸۵	۶۰
۷/۸۱	۷/۸۳	۳۵	۲۵	۴۰
۶/۹۳	۶/۹۴	۱۰	۵۵	۴۰
۹/۳۴	۹/۱۶	۶۰	۸۵	۲۰

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) مدل سطح پاسخ درجه دوم کاسته برای راندمان استخراج موسیلاژ دانه به

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	اندیس F	احتمال
مدل	۷۰/۱۳	۹	۷/۷۹	۱۰/۹۱	<۰/۰۰۱**
A (نسبت آب به دانه)	۲/۶۵	۱	۲/۶۵	۳۴/۶۹	۰/۰۰۲**
B (دما)	۱۳/۰۲	۱	۱۳/۰۲	۱۷۰/۲۷	<۰/۰۰۱**
C (زمان)	۲۶/۱۱	۱	۲۶/۱۱	۳۴۱/۵۴	<۰/۰۰۱**
A ²	۱/۱۰	۱	۱/۱۰	۱۴/۳۶	۰/۰۰۳۵**
B ²	۲/۰۰	۱	۲/۰۰	۲۶/۱۰	۰/۰۰۵**
C ²	۴/۳۴	۱	۴/۳۴	۵۶/۸۱	<۰/۰۰۱**
AB	۰/۰۴۷	۱	۰/۰۴۷	۰/۶۱	۰/۴۵۳۵ ^{NS}
AC	۰/۰۵۰	۱	۰/۰۵۰	۰/۶۵	۰/۴۳۹۳ ^{NS}
BC	۰/۳۱	۱	۰/۳۱	۴/۰۳	۰/۰۷۲۵ ^{NS}
ضعف برازش	۰/۴۹	۵	۰/۰۹۸	۱/۷۶	۰/۲۷۵۱ ^{NS}
خطا	۰/۲۸	۵	۰/۰۵۵		

**معنی دار در سطح ۹۹٪، *معنی دار در سطح ۹۵٪ و NS عدم معنی داری



شکل ۱ - نمودارهای سطح پاسخ متغیرهای استخراج رایج موسیلاژ بر میزان راندمان: نسبت آب به دانه - زمان (الف)، دما - زمان (ب) و نسبت آب به دانه - دما (ج)

رسید (شکل ۱-الف) و این موضوع نشان می‌دهد استخراج به کمک فراصوت از سرعت بالاتری برخوردار بود. به عبارتی تشکیل میکروکانال‌ها و در نتیجه افزایش انتقال جرم، در افزایش فشار اسمزی اطراف دانه‌های به موثر بوده است، اما از آن جایی که جداسدن لایه‌های موسیلاژی در روش رایج به کندی صورت می‌گرفت، لذا فشار اسمزی اطراف دانه‌ها در زمان کوتاه‌تری به تعادل رسید. بنظر می‌رسد استخراج با فراصوت روش پیشنهادی مناسب‌تری برای جداسازی کامل لایه‌های موسیلاژی دانه به باشد.

نتایج این پژوهش نشان داد با افزایش زمان و شدت فراصوت، میزان راندمان استخراج نیز به صورت معنی‌دار ($P < 0/01$) افزایش یافت (جدول ۳). همچنین شدت امواج تاثیر بیشتری بر راندمان

از طرفی افزایش راندمان استخراج در مقایسه با روش رایج مربوط به انتشار امواج در نتیجه‌ی پدیده کاویتاسیون است. انفجار حباب‌ها باعث ایجاد جریان آشفتنه و برخورد تصادفی ذرات با سرعت بالا می‌شود که به تسهیل انتقال جرم کمک می‌کند. علاوه بر این، وقوع کاویتاسیون نزدیک سطح مایع - جامد باعث ایجاد میکروکانال‌هایی می‌شود که در شکست و سایش سطح ذرات نقش دارد. این امر منجر به در معرض قرارگیری سطوح جدیدتر و در نتیجه افزایش انتقال جرم می‌گردد (Vilkhu et al., 2008).

راندمان استخراج با افزایش زمان از ۵ به ۳۰ دقیقه بطور بسیار معنی‌داری افزایش یافت ($p < 0/01$). این در حالی است که در روش رایج پس از گذشت حدود ۴۷/۵ دقیقه، راندمان استخراج به تعادل

تنش برشی در برابر سرعت برشی در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج برازش داده‌های تنش برشی در برابر سرعت برشی با مدل‌ها بیانگر این موضوع بود که هر دو مدل قانون توان و هرشل بالکی از ضریب تبیین (R^2) بالایی برخوردار بودند، اما مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و مجموع مربعات خطا (SSE) در مدل هرشل بالکی نسبت به مدل قانون توان حداقل بود. به همین دلیل مدل هرشل بالکی به خوبی داده‌ها را توصیف کرد. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌گردد، محلول‌های تهیه شده از تمامی تیمارها دارای تنش تسلیم (τ_0) بوده و مقادیر تنش تسلیم نمونه‌ی کنترل بالاتر از انواع استخراج شده به کمک فراصوت بود. علی‌رغم اینکه با افزایش زمان استخراج، میزان تنش تسلیم نمونه‌ها کاهش یافت اما نتایج نشان داد استخراج به کمک فراصوت بر میزان تنش تسلیم محلول‌های موسیلاژ دانه به تاثیر معنی‌داری نداشت.

بررسی شاخص رفتار جریان محلول‌ها حاکی از آن بود که با افزایش شدت و زمان صوت دهی طی استخراج، این شاخص نیز به طور بسیار معنی‌داری افزایش یافت ($P < 0.01$) و رفتار رئولوژیکی محلول‌ها به سمت رفتار مشابه نیوتنی (n بزرگتر) سوق داده شد. Tiwari و همکاران (۲۰۱۰) برای دیسپرسیون‌های پکتین، گوار و زانتان به نتایج مشابهی دست یافتند و نشان دادند با افزایش شدت فراصوت، رفتار جریان دیسپرسیون‌ها تا حد زیادی به رفتار نیوتنی نزدیک شد. ضریب قوام در کلیه تیمارها با افزایش شدت امواج و زمان استخراج، به طور بسیار معنی‌داری کاهش یافت ($P < 0.01$). در گردید کاهش ضریب قوام محلول‌های زانتان و پکتین به میزان زیادی وابسته به شدت امواج فراصوت بود.

شکل ۲ (الف تا ج) نشان‌دهنده ویسکوزیته ظاهری موسیلاژهای استخراج شده به کمک فراصوت در برابر سرعت برشی است که با نمونه کنترل مقایسه گردیده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد با افزایش زمان استخراج، ویسکوزیته ظاهری در تمام شدت‌ها کاهش یافت. هم‌چنین در کلیه تیمارها، بعد از کاهش سریع تا سرعت برشی حدود 10 S^{-1} ، نمودار تغییرات ویسکوزیته تقریباً روند خطی پیدا کرد. به واسطه افزایش سرعت برشی، زنجیره طویل ملکول‌های پلیمر و زنجیره‌هایی که بصورت تصادفی قرار گرفته‌اند، در جهت جریان و در یک ردیف واقع می‌شوند که منجر به کاهش واکنش‌های متقابل بین زنجیره‌های پلیمری مجاور هم می‌گردد (Koocheki et al., 2009b). ویسکوزیته نمونه کنترل بالاتر از نمونه‌های استخراج شده به کمک فراصوت بود. از آن جایی که ویسکوزیته محلول پلیمری تابع وزن ملکولی است، لذا تغییرات معنی‌دار شاخص رفتار جریان و ضریب قوام نمونه‌های تیمار شده با فراصوت نشان‌دهنده تغییرات عمده در ویژگی‌های ملکولی پلیمر در مقایسه با نمونه کنترل می‌باشد (Farahnaky et al., 2013b).

داشت. دلیل این موضوع این است که هنگام عبور امواج فراصوت با شدت بالا، پدیده کاویتاسیون در سطح انرژی بالاتری اتفاق می‌افتد و بنابراین نیروهای برشی قوی‌تری به دانه‌های هیدراته منتقل می‌گردد. لایه‌های موسیلاژی اطراف دانه در معرض این نیروهای قوی قرار گرفته و در نتیجه از سطح دانه جدا می‌شوند. از طرفی با افزایش زمان صوت‌دهی، جداسازی هیدروکلوئیدها تا زمانی ادامه می‌یابد که تمام لایه موسیلاژی جدا گردد. هنگامی که جداسازی هیدروکلوئید کامل گردد، اعمال بیشتر فراصوت منجر به جداسازی لایه‌های سخت دانه شده که این امر می‌تواند در ورود ناخالصی‌های غیر هیدروکلوئیدی به درون محلول، موثر باشد (Farahnaky et al., 2013b).

Liu و همکاران (2010) نتایج مشابهی را در مورد استخراج کربوهیدرات‌های کل از *Stevia rebaudiana* به کمک فراصوت گزارش کردند. این محققان بیان کردند با استفاده از فراصوت در دمای 68°C در مدت ۳۲ دقیقه، راندمان استخراج در مقایسه با روش رایج $1/5$ برابر افزایش یافت. هم‌چنین Li و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهش خود نشان دادند در فرآیند استخراج به کمک فراصوت در مقایسه با روش رایج، راندمان کل پلی‌ساکاریدهای *Zizyphusjuzuba* $27/6\%$ درصد افزایش یافت. در پژوهشی که توسط Zou و همکاران (۲۰۱۱) انجام شد نتایج نشان داد که با افزایش زمان اعمال فراصوت تا ۴۰ دقیقه، راندمان استخراج پلی‌ساکاریدهای *Radix codonopsis* نیز افزایش یافت اما پس از این مدت افزایش معنی‌داری در راندمان مشاهده نشد. هم‌چنین با افزایش توان امواج، میزان راندمان به حداکثر خود (۳۳/۳ درصد) رسید.

جدول ۳. میزان راندمان موسیلاژ استخراج شده به کمک فراصوت

نمونه	تیمار	راندمان (درصد)
۱	۲۰٪ و ۵ دقیقه	$12/1 \pm 0/1^g$
۲	۲۰٪ و ۱۵ دقیقه	$12/28 \pm 0/05^g$
۳	۲۰٪ و ۳۰ دقیقه	$12/68 \pm 0/04^f$
۴	۶۰٪ و ۵ دقیقه	$13/26 \pm 0/06^e$
۵	۶۰٪ و ۱۵ دقیقه	$13/45 \pm 0/04^d$
۶	۶۰٪ و ۳۰ دقیقه	$14/18 \pm 0/07^c$
۷	۱۰۰٪ و ۵ دقیقه	$14/58 \pm 0/04^b$
۸	۱۰۰٪ و ۱۵ دقیقه	$14/69 \pm 0/04^b$
۹	۱۰۰٪ و ۳۰ دقیقه	$15/12 \pm 0/02^a$

نتایج در هرستون که دارای حروف غیر مشابه می‌باشند، دارای اختلاف آماری معنی‌دار ($P < 0/01$) بودند.

بررسی رفتار جریان

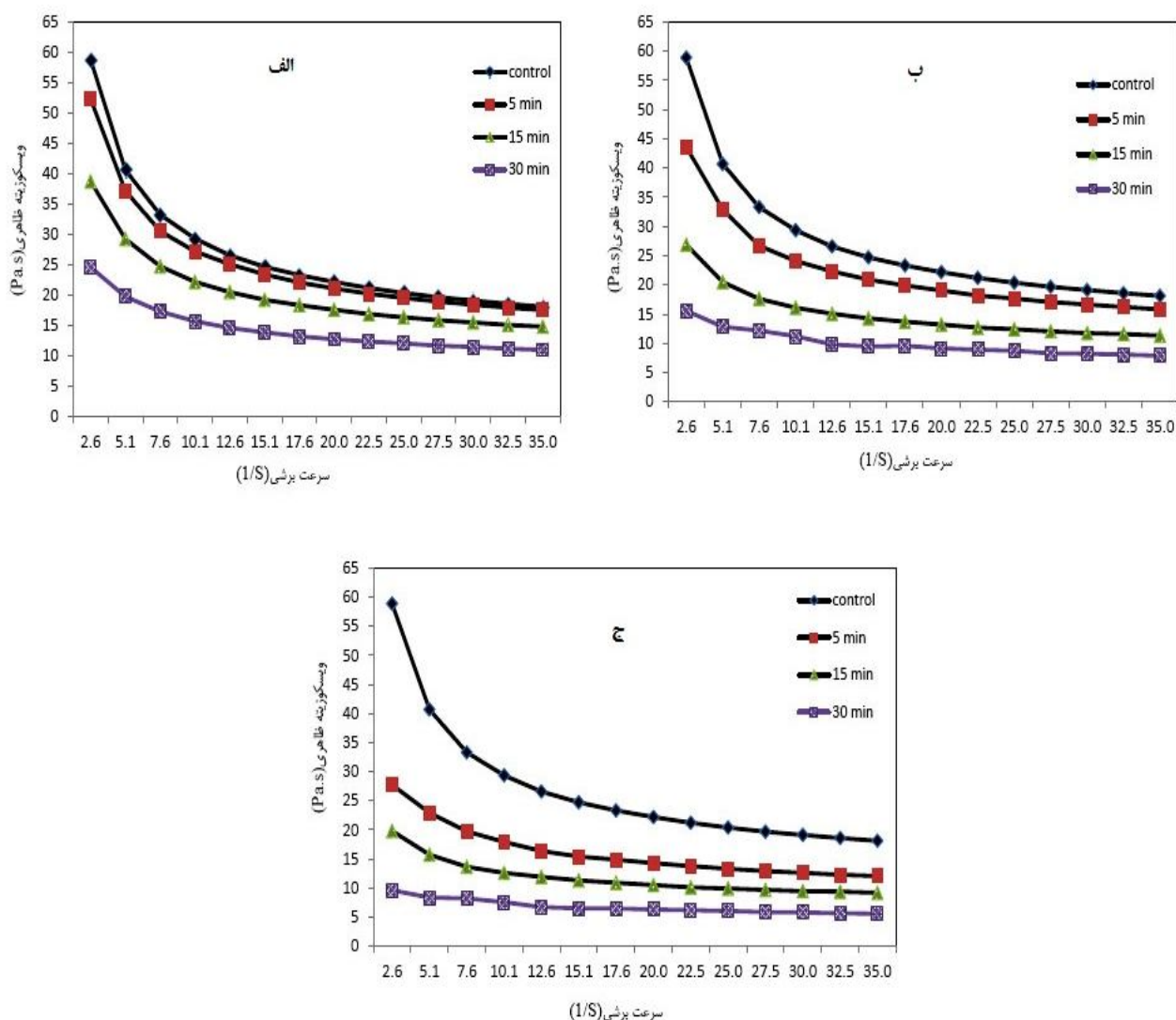
مقادیر تنش تسلیم (τ_0)، ضریب قوام (k) و شاخص رفتار جریان (n) محلول‌های $0/1$ درصد تهیه شده از موسیلاژ استخراج شده به کمک فراصوت، با استفاده از برازش مدل‌های رئولوژیکی بر داده‌های

مشخص شده است که استفاده از امواج فراصوت با قدرت بالا می‌تواند باعث شکستن ملکول‌های پلیمر گردد (Price et al., 1994) که این امر در کاهش ویسکوزیته محلول موثر است. شکست پلیمر در نتیجه‌ی فشار ایجاد شده توسط امواج است که باعث تولید حباب‌های میکروسکوپی می‌گردد. این حباب‌ها به شدت ناپایدار بوده و در کسری از ثانیه از بین می‌روند. به همین دلیل هیدروکلوتید در معرض نیروهای برشی ایجاد شده در اطراف حباب‌های در حال فروپاشی قرار می‌گیرد. علاوه بر این افزایش دمای اطراف این حباب‌ها نیز نقش مهمی در شکست ساختار ماکروملکول‌ها دارد (Karaman et al., 2012).

Seshadri و همکاران (۲۰۰۳) از فراصوت با شدت بالا

جدول ۴- پارامترهای مربوط به برازش داده‌های تنش برشی - سرعت برشی محلول موسیلاژ ۱٪ درصد دانه به استخراج شده به کمک فراصوت بر مدل‌های رئولوژیکی مستقل از زمان قانون توان، هرشل بالکی، بینگام و کسون

قانون توان	شدت ۲۰ درصد			شدت ۶۰ درصد			شدت ۱۰۰ درصد		
	۵ دقیقه	۱۵ دقیقه	۳۰ دقیقه	۵ دقیقه	۱۵ دقیقه	۳۰ دقیقه	۵ دقیقه	۱۵ دقیقه	۳۰ دقیقه
k(Pa.s)	۰/۶۵ ^a	۰/۴۹ ^{abcd}	۰/۳۱ ^{cd}	۰/۵۵ ^{ab}	۰/۳۲ ^{cd}	۰/۱۹ ^{cd}	۰/۳۷ ^{abc}	۰/۲۳ ^{bcd}	۰/۱۲ ^d
n	۰/۶۲ ^f	۰/۶۶ ^{def}	۰/۷۱ ^{ede}	۰/۶۵ ^{ef}	۰/۷۱ ^{bcd}	۰/۷۵ ^{ab}	۰/۶۸ ^{def}	۰/۷۴ ^{abc}	۰/۷۸ ^a
R ²	۰/۹۹۸۵	۰/۹۹۹۳	۰/۹۹۹۷	۰/۹۹۹۲	۰/۹۹۹۵	۰/۹۹۸۵	۰/۹۹۹۷	۰/۹۹۹۵	۰/۹۹۸۱
RMSE	۰/۰۸۲۸۳	۰/۰۶۹۹	۰/۰۴۱۶۹	۰/۰۴۷۸	۰/۰۲۸۱	۰/۰۳۲۶	۰/۰۲۲۸۸	۰/۰۲۳۲	۰/۰۲۶۴
SSE	۰/۰۸۹۱۸	۰/۰۶۳۶	۰/۰۲۲۵۹	۰/۰۲۹۶	۰/۰۱۰۲	۰/۰۱۳۸	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۷	۰/۰۰۹۱
بینگام									
τ_0 (Pa)	۱/۱۵	۰/۹۸ ^a	۰/۷۳ ^{abc}	۰/۸۱ ^{ab}	۰/۴۵ ^{bc}	۰/۲۷ ^c	۰/۵۳ ^{abc}	۰/۳۱ ^{bc}	۰/۱۷ ^c
η (Pa.s)	۰/۱۶	۰/۱۵۵ ^a	۰/۱۳ ^{abc}	۰/۱۴ ^{ab}	۰/۱۰ ^{cd}	۰/۰۷ ^{cd}	۰/۱۱ ^{abc}	۰/۰۹ ^{bcd}	۰/۰۵ ^d
R ²	۰/۹۷۴۲	۰/۹۷۷۸	۰/۹۸۰۰	۰/۹۷۷۵	۰/۹۸۴۷	۰/۹۸۹۰	۰/۹۸۰۹	۰/۹۸۶۸	۰/۹۹۴۶
RMSE	۰/۲۹۴۳	۰/۲۷۰۱	۰/۲۱۰۰	۰/۲۴۹۷	۰/۱۵۱۳	۰/۰۹۱۰	۰/۱۷۸۷	۰/۱۱۵۲	۰/۰۴۵۱۴
SSE	۱/۱۲۶۰	۰/۹۴۸۷	۰/۵۹۰۰	۰/۸۱۰۰	۰/۳۹۷۷	۰/۱۰۷۶	۰/۴۱۵۱	۰/۱۷۲۴	۰/۰۲۶۴
هرشل بالکی									
τ_0 (Pa)	۰/۲۶	۰/۲۳ ^{ab}	۰/۰۷ ^b	۰/۰۷ ^b	۰/۰۳ ^b	۰/۰۱ ^b	۰/۰۶ ^b	۰/۰۴ ^b	۰/۰۶ ^b
k(Pa.s)	۰/۶۵	۰/۵۸ ^a	۰/۳۹ ^{bcd}	۰/۴۸ ^{ab}	۰/۲۸ ^{ade}	۰/۱۷ ^{ef}	۰/۴۲ ^{bc}	۰/۲۴ ^{def}	۰/۱ ^f
n	۰/۶۲	۰/۶۶ ^a	۰/۶۹ ^d	۰/۶۷ ^c	۰/۷۲ ^c	۰/۷۷ ^b	۰/۶۸ ^{de}	۰/۷۳ ^c	۰/۸۴ ^a
R ²	۰/۹۹۹۱	۰/۹۹۸۵	۰/۹۹۹۳	۰/۹۹۹۲	۰/۹۹۹۵	۰/۹۹۸۵	۰/۹۹۹۷	۰/۹۹۹۵	۰/۹۹۸۱
RMSE	۰/۰۵۸۱۸	۰/۰۶۹۹	۰/۰۴۱۶۹	۰/۰۴۷۷	۰/۰۲۸۱	۰/۰۳۲۶	۰/۰۲۲۸۸	۰/۰۲۳۲	۰/۰۲۶۴۱
SSE	۰/۰۴۰۶	۰/۰۳۸۶	۰/۰۱۲۹	۰/۰۲۵۸	۰/۰۰۹۸	۰/۰۱۲۴	۰/۰۰۶۷۶	۰/۰۰۶۹۰	۰/۰۰۴۷۲
کسون									
τ_0 (Pa)	۰/۵۴	۰/۴۳ ^a	۰/۳۰ ^{abc}	۰/۳۴ ^{ab}	۰/۱۶ ^{bc}	۰/۰۸ ^{bc}	۰/۲۰ ^{abc}	۰/۱۱ ^{bc}	۰/۰۵ ^c
η (Pa.s)	۰/۳۰	۰/۳۱ ^a	۰/۲۹ ^{ab}	۰/۳۱ ^{ab}	۰/۲۷ ^{bc}	۰/۲۳ ^{cd}	۰/۲۷ ^{ab}	۰/۲۵ ^{bc}	۰/۲۰ ^d
R ²	۰/۹۹۶۱	۰/۹۹۶۵	۰/۹۹۷۲	۰/۹۹۵۸	۰/۹۹۷۳	۰/۹۹۷۴	۰/۹۹۶۲	۰/۹۹۷۴	۰/۹۹۸۷
RMSE	۰/۱۱۴۹	۰/۱۰۷۰	۰/۰۸۱۸	۰/۱۰۷۹	۰/۰۶۳۴	۰/۰۴۳۹	۰/۰۷۹۲	۰/۰۵۰۷۸	۰/۰۲۲۲
SSE	۰/۱۷۱۵	۰/۱۴۸۷	۰/۰۸۷۱۵	۰/۱۵۱۴	۰/۰۵۲۰	۰/۰۲۵۰	۰/۰۸۱۶	۰/۰۳۳۵۲	۰/۰۰۶۴۵



شکل ۲ - مقایسه ویسکوزیته ظاهری موسیلاژهای استخراج شده با فراصوت با کنترل در شدت‌های ۲۰ درصد (الف)، ۶۰ درصد (ب) و ۱۰۰ درصد (ج) با نمونه کنترل در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد

حلالیت

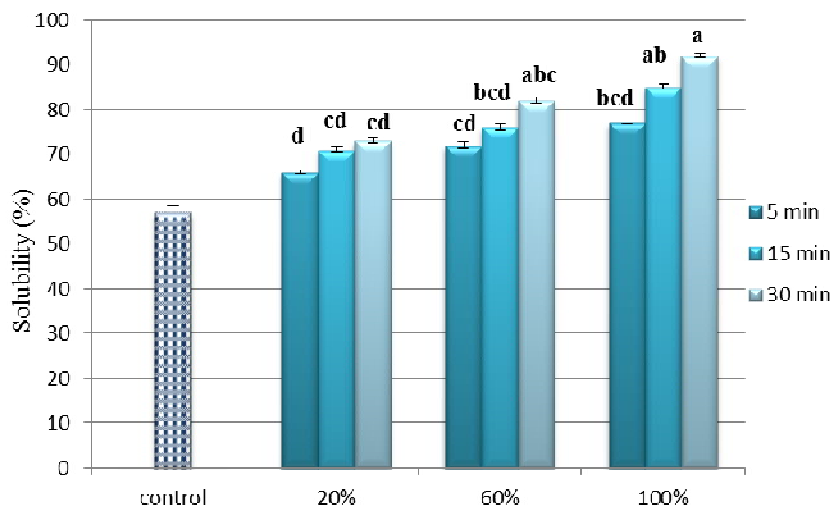
برخی از هیدروکلوئیدها، حداکثر خواص عملکردی خود را پس از انحلال کامل در آب نشان می‌دهند (Laaman, 2011). هر چند نیاز به حرارت جهت افزایش حلالیت باعث می‌شود که نتوان از هیدروکلوئیدها بصورت گسترده در صنایع حساس به حرارت استفاده کرد. نتایج آنالیز واریانس نشان داد که اثر شدت و زمان استخراج بر حلالیت بسیار معنی‌دار بود؛ بطوری که با افزایش این دو پارامتر، حلالیت موسیلاژ در آب نیز افزایش یافت ($P < 0.01$). حلالیت نمونه‌ها بسته به شرایط استخراج بین ۶۶ تا ۹۲ درصد متغیر بود (شکل ۳). طیف گسترده حلالیت نمونه‌ها احتمالاً به دلیل وزن ملکولی متفاوت موسیلاژها بود. ساختار و وزن ملکولی دو فاکتور مهم و تعیین‌کننده

حلالیت پلی‌ساکاریدها بشمار می‌روند. برای نمونه‌های مشابه، با کاهش وزن ملکولی انحلال اغلب افزایش می‌یابد (Cui, 2005). علت این است که جدا شدن ذرات با وزن ملکولی بالا و سپس انتشار به داخل محلول در مقایسه با ذرات با وزن ملکولی کم‌تر، در زمان طولانی‌تری اتفاق می‌افتد. تحقیقات نشان می‌دهد سرعت انحلال صمغ گوار با وزن ملکولی گالاتومانان‌ها رابطه عکس داشت (Wang et al., 2003). نتایج پژوهش‌های پیشین حاکی از آن بود که تیمار با فراصوت نقش موثری در بهبود حلالیت آگزوپلی‌ساکاریدهای با وزن ملکولی بالا داشت (Wang et al., 2010). علاوه بر این کاهش نظم ساختار ملکولی نیز منجر به افزایش حلالیت می‌گردد (Wang et al., 2003). از آنجایی که افزایش شدت و زمان استخراج باعث از بین

مراحل اولیه و سپس تخریب شبکه تشکیل شده به کمک اتصالات عرضی را عامل اصلی افزایش حلالیت عنوان کردند. همچنین در این پژوهش مشخص گردید زمان اعمال فراصوت بر حلالیت دارای تاثیر معنی داری بود زیرا گروه‌های هیدروفیل به صورت کامل در معرض ملکول‌های آب قرار گرفتند. در پژوهش دیگری که توسط Manchun و همکاران (۲۰۱۲) انجام شد، حلالیت نشاسته‌های تاپوکا تیمار شده با فراصوت با انواع حرارت دیده و نمونه بدون تیمار، مقایسه شد. این محققان بیان کردند با افزایش زمان صوت‌دهی (از ۱۰ تا ۳۰ دقیقه) حلالیت نشاسته در آب افزایش یافت که علت آن شکست پیوندهای کووالانسی و ساختار کریستالی نشاسته در اثر پدیده کاویتاسیون بود. اما با افزایش شدت فراصوت از ۵۰ به ۱۰۰ درصد، تغییر معنی‌داری در حلالیت نمونه‌ها مشاهده نکردند.

رفتن ساختار منظم پلی‌ساکاریدهای موجود در موسیلاژ شده است، لذا حلالیت نمونه‌ها نیز افزایش یافته است. حلالیت نمونه کنترل در دمای 25°C برابر با $1/41 \pm 57$ درصد تعیین شد که بالاتر از حلالیت برخی از صمغ و موسیلاژهای گیاهی نظیر انواع وارپته‌های کتان ۴۰-۱۵ درصد (Kaewmaneeet al., 2014)، لوبیای لوکاست ۴۵ درصد (Dakiaet al., 2008) و *Eruca sativa* ۲۸/۵ درصد (Koocheki et al., 2012) بود اما در مقایسه با صمغ مسکوئیت ۶۹ درصد (López-Franco et al., 2013) حلالیت کمتری نشان داد.

نتایج این پژوهش در ارتباط با اثر شدت و زمان فراصوت بر حلالیت، مطابق با تحقیقات انجام شده تا کنون بود. Farahnaky و همکاران (۲۰۱۳-a) نیز گزارش کردند پس از یک دقیقه صوت‌دهی، حلالیت کاپا-کاراجینان در مقایسه با نمونه بدون تیمار، ۳/۲ برابر افزایش یافت. این محققان ضعیف شدن نیروهای بین ملکولی در



شکل ۳- درصد حلالیت موسیلاژ استخراج شده به کمک فراصوت

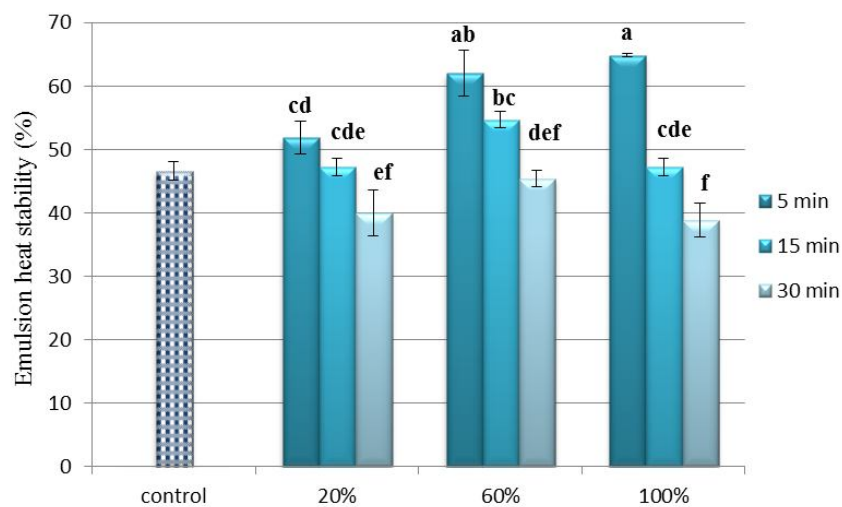
با صمغ هلو، زانتان و صمغ عربی نشان داد که وزن ملکولی بالا و دارا بودن انشعاب بیشتر در بهبود پایداری امولسیون موثر بوده است (Jindal et al., 2013). وزن ملکولی بالا به پلی‌ساکارید اجازه می‌دهد که لایه پایدارکننده ضخیمی ایجاد نماید و از ذرات امولسیون در برابر شوک حرارتی محافظت کند (Chanamai, R., & McClements, 2002). در مورد اثر شدت امواج فراصوت طی استخراج موسیلاژ بر پایداری امولسیون‌های تهیه شده، نتایج مشابهی مشاهده نشد. بطوری که با افزایش شدت استخراج به کمک فراصوت از ۲۰ به ۶۰ درصد پایداری امولسیون تهیه شده افزایش و سپس با افزایش شدت استخراج تا ۱۰۰ درصد این ویژگی کاهش یافت. این در حالی است که با افزایش شدت امواج طی استخراج، ضریب قوام و ویسکوزیته موسیلاژ کاهش یافته بود. علاوه بر این پایداری امولسیون

پایداری امولسیون

همانطور که در شکل ۴ ملاحظه می‌گردد، با افزایش زمان استخراج به کمک فراصوت میزان پایداری امولسیون‌های تهیه شده از موسیلاژ کاهش یافت ($P < 0.01$). قانون استوک بیان می‌کند که سرعت حرکت ذرات امولسیون با ویسکوزیته رابطه عکس دارد (McClements, 2005)، زیرا افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته باعث کاهش سرعت جابجایی و جدا شدن ذرات امولسیون از یکدیگر می‌شود (Damodaran, 2005). با گذشت زمان به دلیل تاثیر امواج فراصوت بر ساختار پلی‌ساکاریدی موسیلاژ، احتمالاً پلی‌ساکارید به واحدهای کوچکتر شکسته شده و در نتیجه وزن ملکولی موسیلاژ نیز کاهش یافته و این امر منجر به کاهش ویسکوزیته امولسیون شده است (Price et al., 1994). پژوهش‌های قبلی انجام شده در ارتباط

محققان گزارش کردند اثر پایدارکنندگی صمغ کتیرا در امولسیون بطور کلی مربوط به افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته و در نتیجه محدود کردن حرکت ذرات امولسیفیه شده روغن بود. اما نتایج این پژوهش نشان داد گونه *Astragalus fluccosus* با وجود ویسکوزیته کمتری که از گونه *Astragalus compactus* داشت، پایداری امولسیون بیشتری را نشان داد. همچنین Huang و همکاران (۲۰۰۱) بیان کردند افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته تنها عامل پایداری امولسیون نمی‌باشد، بطوریکه برخلاف ویسکوزیته ظاهری پایین محلول صمغ عربی در مقایسه با سایر هیدروکلوئیدهای مورد آزمون، این صمغ به دلیل دارا بودن پروتئیناز پایداری امولسیون بالایی برخوردار بود. رضوی و همکاران (۱۳۹۰) نیز در پژوهش خود نشان دادند با وجود این که صمغ دانه شاهی نسبت به صمغ دانه‌های قدومه شهری و شیرازی، زانتان، مرو، گوار و لوبیای اقاچیا دارای ضریب قوام کمتری بود اما پایداری امولسیون بالاتری را نشان داد. این محققان اظهار داشتند دلیل این امر عملکرد بهتر هموزنایزر به دلیل ویسکوزیته پایین صمغ دانه شاهی بود که به علت تولید ذراتی با اندازه کوچک توانست امولسیون پایدارتری تولید کند.

تهیه شده با نمونه کنترل برابر $46/63 \pm 0/52$ درصد تعیین گردید که در مقایسه با امولسیون تهیه شده از موسیلاژهای استخراج شده در زمان کوتاه (۵ دقیقه) پایداری کمتری را نشان داد. عبارت دیگر اعمال زمان کوتاه یا شدت ضعیف تا متوسط امواج در استخراج، علی‌رغم کاهش ویسکوزیته نسبت به نمونه کنترل باعث افزایش پایداری امولسیون‌ها گردید. این امر احتمالاً به دلیل حساس‌تر بودن کربوهیدرات‌های با وزن ملکولی بالا نسبت به تخریب توسط فراصوت در مقایسه با پروتئین‌ها می‌باشد (Zhang et al., 2011). بطوری که بنظر می‌رسد در شدت و زمان‌های کوتاه اعمال امواج فراصوت ساختار پلی‌ساکاریدها با وزن ملکولی بالا باز شده ولی ساختار پروتئین‌ها همچنان حفظ شده است. Jouki و همکاران (2013) در پژوهش خود نشان دادند موسیلاژ دانه به حاوی $3/39$ درصد پروتئین می‌باشد. لذا طی استخراج به کمک فراصوت (بخصوص در شدت‌های ضعیف و زمان‌های کوتاه) ساختار پروتئین کمتر دنا توره شده و این امر در پایداری بیشتر امولسیون موثر بوده است. در پژوهشی که Ahmadi Gavalighi و همکاران (۲۰۱۳) انجام دادند، ارتباط ویسکوزیته فاز پیوسته امولسیون‌های تهیه شده از گونه‌های متفاوت صمغ کتیرا با پایداری امولسیون ارزیابی شد. این



شکل ۴- پایداری امولسیون روغن در آب (درصد) تهیه شده با موسیلاژ استخراج شده به کمک فراصوت

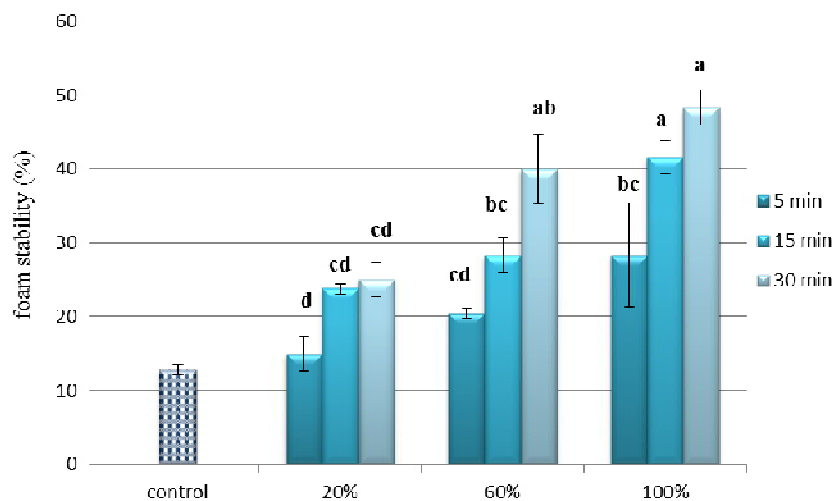
دلیل استفاده از پایدارکننده‌های کف ضروری بنظر می‌رسد. مطابق با نتایج آنالیز واریانس، اثر شدت و زمان استخراج بر پایداری کف با احتمال ۹۹ درصد معنی‌دار بود. میزان پایداری کف نمونه‌های مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. پایداری کف نمونه کنترل برابر $12/79 \pm 0/77$ درصد تعیین گردید. میانگین داده‌های مربوط به موسیلاژهای استخراج شده با فراصوت حاکی از افزایش $17/31$ درصد در پایداری کف این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه کنترل بود. این امر

پایداری کف

کف در صنعت غذا به خصوص فرآورده‌های لبنی، گوشتی و قنادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Balerinet al., 2007). سیستم‌های گاز - مایع بر پایه سفیده تخم‌مرغ بخش عمده‌ای از کف‌های غذایی را شامل می‌شوند (Ptaszek et al., 2014). ناپایداری ترمودینامیکی، ویژگی عمده کف محسوب می‌گردد که با گذشت زمان باعث فروپاشی کف می‌گردد (Indrawatiet al., 2008)، به همین

دارد. بنظر می‌رسد برقراری پیوند میان ملکول‌های آب و گروه‌های هیدروکسیل آزاد موسیلاژهای استخراج شده به کمک فراصوت، در جلوگیری از بهم پیوستن حباب‌های کف موثر بوده است. افزایش زمان و شدت استخراج، نقش موثری در پایداری کف توسط موسیلاژها داشت؛ بطوری که موسیلاژهای استخراج شده با شدت‌های ۶۰ و ۱۰۰ درصد طی ۳۰ دقیقه صوت‌دهی، بالاترین میزان پایداری کف را نشان دادند. Marray (۲۰۰۷) اظهار داشت سورفاکتانتهایی با وزن ملکولی کم، به علت مقاومت بیشتر در برابر پیوستگی حباب‌های کف، پایدارکننده‌های مناسب‌تری بشمار می‌روند. همچنین پایدارکننده‌هایی با وزن ملکولی کم نسبت به ملکول‌های پلیمر و پروتئین، نقش موثرتری در کاهش کشش سطحی دارند (Norde, 2011). علاوه بر این ذرات با اندازه کوچکتر به حداقل دوفاز متصل شده و باعث پایداری مکانیکی لاملا می‌شوند (Pugh, 1996).

احتمالاً مربوط به میزان حرکت ملکول‌های موسیلاژ در فصل مشترک دو فاز می‌باشد (Makri&Doxastakis, 2007). عبارتی کارایی یک پایدارکننده وابسته به سرعت جذب در مرز میان دو فاز است (Indrawatiet al., 2008). از آنجایی که موسیلاژهای استخراج شده با فراصوت (بخصوص در زمان طولانی یا شدت بالا) دارای وزن ملکولی کمتری نسبت به نمونه کنترل بودند، لذا سرعت جذب آن‌ها در سطح حباب‌های کف بالاتر بود (Norde, 2011) و سرعت انتقال جرم و جذب ملکول‌های نمونه کنترل در حفاصل دو فاز به دلیل وزن ملکولی بالاتر، به اندازه‌ای نبود که بتواند حباب‌های کوچک کف را پایدار سازد. از طرفی ترکیبات قندی دارای تعداد زیادی گروه‌های هیدروکسیل می‌باشند که با ملکول‌های آب واکنش داده و باعث کاهش حرکت آن‌ها می‌گردد (Ochi et al., 2000). طی پدیده کاویتاسیون، تنش برشی باعث باز شدن حالت پیچشی ملکول‌های پلیمر می‌گردد (Zhang et al., 2011) که این امر در آزادسازی گروه‌های هیدروکسیل شرکت‌کننده در پیوندهای میان ملکولی نقش



شکل ۵- درصد پایداری کف ایجاد شده توسط موسیلاژ استخراج شده به کمک فراصوت

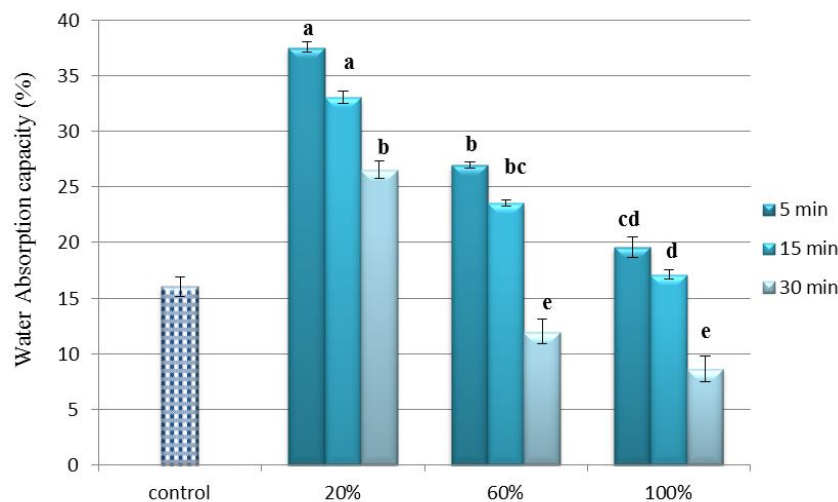
ماکروملکول‌هایی با ساختمان یکنواخت از قابلیت جذب آب بالاتری برخوردارند (Hermansson et al., 1986). به همین دلیل از آن جایی که طی تیمار ضعیف فراصوت، ساختار پلی‌ساکارید کمتر آسیب دیده و یکنواختی حفظ می‌گردد لذا جذب آب نمونه‌ها بالاتر بود. از طرفی کاربرد صمغ و موسیلاژ مربوط به قابلیت آن‌ها در جذب و نگهداری آب بمنظور تشکیل ژل است (Simas-Tosin et al., 2010). اما استفاده از فراصوت با شدت بالا و طی زمان طولانی بر قابلیت تشکیل ژل آن‌ها اثر منفی دارد زیرا اتصالات عرضی برای به دام انداختن آب تخریب می‌شود (Feng et al., 2011) به همین دلیل جذب آب موسیلاژ کاهش می‌یابد.

قابلیت جذب آب

نکته قابل ملاحظه در ارتباط با قابلیت جذب آب نمونه‌ها این بود که بطور کلی در مقایسه با نمونه کنترل، موسیلاژهای استخراج شده با فراصوت جذب آب بالاتری داشتند (شکل ۶). افزایش قابلیت جذب آب به خصوص در شدت و زمان‌های کم اعمال فراصوت قابل توجه بود؛ بطوری که این ویژگی در نمونه استخراج شده با شدت ۲۰٪ و زمان ۵ دقیقه نسبت به نمونه کنترل ۵۷٪ افزایش یافت. با افزایش شدت و زمان صوت‌دهی طی استخراج موسیلاژها، قابلیت جذب آب کاهش یافت. قابلیت جذب آب توانایی یک ماده در واکنش با مقادیر کم آب را نشان می‌دهد (Singh, 2001). گزارش شده است

آب را دلیل این امر بیان کردند. هم چنین نتایج نشان داد با افزایش زمان صوت‌دهی طی شدت ثابت، از میزان جذب آب نشاسته‌ها کاسته شد.

نتایج پژوهش مشابهی که توسط Sit و همکاران (۲۰۱۳) انجام شد، نشان داد نشاسته‌های تیمار شده با فراصوت در مقایسه با نمونه کنترل از جذب آب بالاتری برخوردار بودند. این محققان شکستن ساختار نشاسته و در معرض قرارگیری گروه‌های هیدروفیل در برابر



شکل ۶- قابلیت جذب آب (g/g) موسیلاژ استخراج شده به کمک فراصوت

نزدیک شد. افزایش حلالیت و کاهش قابلیت جذب آب و ویسکوزیته نمونه‌ها بخصوص در شدت و زمان‌های بالا، به دلیل انتقال حرارت سریع‌تر و بهبود کارایی پمپ، استفاده از موسیلاژهای استخراج شده به کمک فراصوت را در تهیه نوشیدنی‌ها امکان‌پذیر می‌کند. اگرچه ویسکوزیته موسیلاژ طی استخراج با فراصوت کاهش یافت اما افزایش قابل توجه راندمان و سایر خواص عملکردی تاییدکننده این است که استخراج به کمک فراصوت می‌تواند بعنوان روشی برای جایگزین شدن با روش رایج (استخراج آبی) پیشنهاد گردد. استخراج موسیلاژ دانه به با امواج فراصوت گام موثری در راستای صنعتی کردن استخراج هیدروکلوئیدهای بومی برای استفاده در فرآورده‌های غذایی محسوب می‌گردد که البته هنوز نیازمند پژوهش‌های بیشتری خواهد بود.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد با افزایش شدت و زمان استخراج با فراصوت، میزان راندمان، حلالیت و پایداری کف نمونه‌ها نیز افزایش قابل توجهی یافت ($p < 0.01$). جذب آب و پایداری امولسیون نیز اگرچه با افزایش شدت و زمان صوت‌دهی کاهش یافتند اما این دو پارامتر در مقایسه با نمونه کنترل، بالاتر بودند. در کلیه نمونه‌های استخراج شده به کمک فراصوت، ویسکوزیته ظاهری کمتر از نمونه کنترل بود که این موضوع انجام فرآوری‌های خاص نظیر خشک کردن فرآورده حاوی موسیلاژ را بصورت پاششی فراهم می‌آورد و حتی در ادامه پس از استخراج به دلیل هموزن بودن محلول، برای خشک کردن موسیلاژ نیز به انرژی کمتری نیاز خواهد بود. با افزایش زمان یا شدت امواج فراصوت رفتار جریان نمونه‌ها از رفتار هرشل بالکی به نیوتنی

منابع

- رضوی، س.م.ع.، بستان، الف.، نیک‌نیا، س. و رزمخواه، س. ۱۳۹۰. بررسی خواص عملکردی عصاره خام هیدروکلوئیدی برخی دانه‌های بومی ایران. نشریه پژوهش‌های صنایع غذایی، ۲۱: ۳۷۹ تا ۳۸۹.
- Ahmadi Gavlighi, H., Meyer, A.S., Zaidel, D.N.A., Mohammadifar, M.A., and Mikkelsen, J.D. 2013. Stabilization of emulsions by gum tragacanth (*Astragalus* spp.) correlates to the galacturonic acid content and methoxylation degree of the gum. *Food Hydrocolloids*, 31: 5-14.
- Amin, M. A., Shamsuddin Ahmad, A., Yinyin, Y., Yahya, N., and Ibrahim, N. 2007. Extraction, purification and characterization of durian (*Durio zibethinus*) seedgum. *Food Hydrocolloids*, 21, 273-279.

- Badenes, M.I., and Byrne, D.H. 2012. *Fruit Breeding, Hand book of Plant Breeding*, vol. 8, Springer New York Dorderrht Heidelberg London
- Balerin, C., Aymard, P., Ducept, F., Vaslin, S., Cuvelier, G. 2007. Effect of formulation and processing factors on the properties of liquid food foams. *Journal of Food Engineering*, 78, 802-809.
- Benito-Román, O., Alonso, E., and Cocero, M. J. 2013. Ultrasound-assisted extraction of β -glucans from barley. *LWT - Food Science and Technology*, 50: 57-63
- Cai, W., Gu, X., and Tang, J. 2008. Extraction, purification, and characterization of the polysaccharides from *Opuntia milpa alta*. *Carbohydrate Polymers*, 71, 403-410.
- Chanamai, R., and McClements, D. J. 2002. Comparison of gum arabic, modified starch, and whey protein isolate as emulsifiers: influence of pH, CaCl_2 and temperature. *Journal of Food Science*, 67, 120-125.
- Cui, S.W. 2005. *Understanding the Physical Properties of Food Polysaccharides* in Food carbohydrates: chemistry, physical properties, and applications. CRC press by Taylor & Francis Group. ISBN 0-8493-1574-3
- Cui, W., Eskin, N.A.M., and Biliaderis, C.G. 1993. Chemical and physical properties of yellow mustard (*Sinapis alba* L.) mucilage. *Food Chemistry*, 46: 169-176.
- Dakia, P., Blecker, C., Robert, C., Wathélet, B., and 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.
- Damodaran S. 2005. Protein stabilization of emulsions and foams. *Journal of Food Science*, 70:54-66.
- Fabre, J.F., Lacroux, E., Valentin, R., and Mouloungui, Z. 2014. Ultrasonication as a highly efficient method of flaxseed mucilage extraction. *Industrial Crops and Products*, in press, <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.11.015>.
- Farahnaky, A., Azizi, R., Majzoobi, M., Mesbahi, Gh., and Maftoonazad, N. 2013a. Using power ultrasound for cold gelation of kappa-carrageenan in presence of sodium ions. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 20: 173-181.
- Farahnaky, A., Bakhshizadeh-Shirazi, Sh., Mesbahi, Gh., Majzoobi, M., Rezvani, E., and Schleining, G. 2013b. Ultrasound-assisted isolation of mucilaginous hydrocolloids from *Salvia macrosiphon* seeds and studying their functional properties. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 20: 182-190.
- Farzi, M., Saari, M.M., Emam-Djomeh, Z., and Mohammadifar, M.A. 2011. Effect of ultrasonic treatment on the rheological properties and particle size of gum tragacanth dispersions from different species. *International Journal of Food Science and Technology*, 46: 849-854
- Feng, H., Barbosa-Cánovas, G., and Weiss, J. 2011. *Engineering Food Ingredients with High-Intensity* in *Ultrasound in Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing*. Springer New York Dordrecht Heidelberg London, 239-270.
- Golalikhani, M., Khodaiyan, F., and Khosravi, A. 2014. Response surface optimization of mucilage aqueous extraction from flaxweed (*Descurainia sophia*) seeds. *International Journal of Biological Macromolecules*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.07.018>.
- Gronroos, A., Pirakonen, P., and Kyllonen, H. 2008. Ultrasonic degradation of aqueous carboxymethyl cellulose: effect of viscosity, molecular mass and concentration. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15: 644-648.
- Haug, X., Kakuda, Y., and Cui, W. 2001. Hydrocolloids in emulsions: particle size distribution and interfacial activity. *Food Hydrocolloids*, 15:533-542.
- Hermansson, A.M., Harbitz, O., and Langton, M. 1986. Formation of two types of bovine myosin gels. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 37: 69-83.
- Hou, X. J., and Chen, W. 2008. Optimization of extraction process of crude polysaccharides from wild edible BaChu mushroom by response surface methodology. *Carbohydrate Polymers*, 72: 67-74.
- Iida, Y., Tuziuti, T., Yasui, K., Towata, A., and Kozuka, T. 2008. Control of viscosity in starch and polysaccharide solutions with ultrasound after gelatinization. *Innovative Food Science and Emerging Tech.* 9:140-146.
- Indrawati, L., Wang, Z., Narsimhan, G., Gonzalez, J. 2008. Effect of processing parameters on foam formation using a continuous system with a mechanical whipper. *Journal of Food Engineering*, 88: 65-74.
- Jambrak, A.R., Herceg, Z., Subaric, D., Babic, J., Brncic, M., Brncic, S.R., Bosiljkov, T., Cvek, D., Tripalo, B., and Gelo, J. 2010. Ultrasound effect on physical properties of cornstarch. *Carbohydrate Polymers*, 79:91-100.
- Jiang, Ch., Li, X., Jiao, Y., Jiang, D., Zhang, L., Fan, L., and Zhang, Q. 2014. Optimization for ultrasound-assisted extraction of polysaccharides with antioxidant activity in vitro from the aerial root of *Ficus microcarpa*. *Carbohydrate Polymers*, 110: 10-17.
- Jindal, M., Kumay, V., Rana, V., and Tiwary, A.K. 2013. Exploring potential new gum source *Aegle marmelos* for food and pharmaceuticals: Physical, chemical and functional performance. *Industrial Crops and Products*, 45: 312-318.
- Jouki, M., Mortazavi, S.A., Tabatabaei Yazdi, F., and Koocheki, A. 2014. Characterization of antioxidant-antibacterial quince seed mucilage films containing thyme essential oil. *Carbohydrate Polymers*, 99: 537-546.

- Jouki, M., Mortazavi, S.A., Yazdi, F.T., and Koocheki, A. 2014. Optimization of extraction, antioxidant activity and functional properties of quince seed mucilage by RSM, *International Journal of Biological Macromolecules*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.02.026>.
- Jouki, M., Tabatabaei Yazdi, F., Mortazavi, S.A., and Koocheki, A. 2013. Physical, barrier and antioxidant properties of a novel plasticized edible film from quince seed mucilage. *International Journal of Biological Macromolecules*, 62: 500-507
- Kaewmanee, Th., Bagnasco, L., Benjakul, S., Lanteri, S., Morelli, C.F., Speranza, G., and Cosulich, M.E. 2014. Characterisation of mucilages extracted from seven Italian cultivars of flax. *Food Chemistry*, 148: 60-69.
- Karaman, S., Yilmaz, M.T., Ertugay, M.F., Baslar, M., Kayacier, A. 2012. Effect of ultrasound treatment on steady and dynamic shear properties of glucomannan based salep dispersions: Optimization of amplitude level, sonication time and temperature using response surface methodology. *Ultrasonics Sonochemistry*, 19: 928- 938.
- Karazhiyan, H., Razavi, S.M.A., and Phillips, G.O. 2011. Extraction optimization of a hydrocolloid extract from cress seed (*Lepidium sativum*) using response surface methodology. *Food Hydrocolloids*, 25: 915-920.
- Koocheki, A., Mortazavi, S.A., Shahidi, F., Razavi, S.M.A., Kadkhodae, R., Milani, J. 2010. optimization of mucilage extraction from Qodume Shirazi seed (*Alyssum Homolocarpum*) using response surface methodology. *Journal of Food Process Engineering*, 33: 861-882.
- Koocheki, A., Mortazavi, S.A., Shahidi, F., Razavi, S.M.A., and Taherian, A.R. 2009b. Rheological properties of mucilage extracted from *Alyssum homolocarpum* seed as a new source of thickening agent. *Journal of Food Engineering*, 91: 490-496.
- Koocheki, A., Razavi, S.M.A., and Hesarinajad, M.A. 2012. Effect of Extraction Procedures on Functional Properties of *Eruca sativa* Seed Mucilage. *Food Biophysics*, 7: 84-92.
- Koocheki, A., Taherian, A.R., Razavi, S.M.A., Bostan, A. 2009a. 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.
- Laaman, T.R. 2011. Hydrocolloids: Fifteen Practical Tips. In *Hydrocolloids in Food Processing*; Blackwell Publishing Ltd. and Institute of Food Technologists, Wiley-Blackwell: Oxford, UK.
- Li, J., Ai, L., Hang, F., Ding, Sh., and Liu, Y. 2014. Composition and antioxidant activity of polysaccharides from jujuba by classical and ultrasound extraction. *International Journal of Biological Macromolecules*, 63: 150-153.
- Liu, J., Li, J.W., and Tang, J. 2010. Ultrasonically assisted extraction of total carbohydrates from *Stevia rebaudiana* Bertoni and identification of extracts. *Food and Bioprocess Technology*, 88: 215-221.
- López-Franco, Y.L., Cervantes-Montaño, C.I., Martínez-Robinson, K.G., Lizardi-Mendoza, J., and Robles-Ozuna, L.E. 2013. Physicochemical characterization and functional properties of galactomannans from mesquite seeds (*Prosopis* spp.). *Food Hydrocolloids*, 30: 656- 660.
- Makri, E. A., and Doxastakis, G. I. 2007. Surface tension of *Phaseolus vulgaris* and coccineus proteins and effect of polysaccharides on their foaming properties. *Food Chemistry*, 101: 37-48.
- Manchun, S., Nunthanid, J., Limmatvapirat, S., and Sriamornsak, P. 2012. Effect of Ultrasonic Treatment on Physical Properties of Tapioca Starch. *Advanced Materials Research*, 506: 294-297.
- McClements, D. J. 2005. Food emulsions: Principles, practice, and techniques. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Murray, B. S. 2007. Stabilization of bubbles and foams. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 12: 232-241.
- Nikoofar, E., Hojjatoleslami, M., and Shariaty, M.A. 2013. Surveying the Effect of Quince seed Mucilage as a Fat Replacer on Texture and Physicochemical Properties of Semi Fat Set Yoghurt. *International Journal of Farming and Allied Sciences*, 2: 861- 865.
- Norde, W. 2011. *Emulsions and foams* in Colloids and Interfaces in Life Sciences and Bionanotechnology. Second Edition, CRC press, 371- 372.
- Ochi, A., Katsuta, K., Maruyama, E., Kubo, M., and Ueda, T. 2000. Effects of sugars on stability of egg foam and their rheological properties. *Hydrocolloids*, 2: 275-280.
- Price, G.J., West, P.J., and Smith, P.F. 1994. Control of polymer structure using power ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 1: 51-57.
- Ptaszek, P., Kabziński, M., Kruk, J., Kaczmarczyk, K., Żmudziński, D., Liszka-Skoczylas, M., Mickowska, B., Lukaszewicz, M., Banaś, J. 2014. The effect of pectins and xanthan gum on physicochemical properties of egg white protein foams. *Journal of Food Engineering*, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.07.017>.
- Pugh, R.J. 1996. Foaming, foam films, antifoaming and defoaming. *Advances in Colloid and Interface Science*, 64- 67.
- Ritzoulis, C., Marini, E., Aslanidou, A., Georgiadis, N., Karayannakidis, P., Koukiotis, C., Filotheou, A., Lousinian, S., Tzimpilis, E., Hydrocolloids from quince seed: Extraction, characterization, and study of their emulsifying/stabilizing capacity, *Food Hydrocolloids* (2014), doi:10.1016/j.foodhyd.2014.03.031.
- Sciari, L.S., Malsonado, F., Ribotta, P.D., Perez, G.T., and Leon, A.E. 2008. Chemical composition and functional

- properties of Gleditsiatriacanthos gum. *Food Hydrocolloids*, 23, 306–313.
- Sepulveda, E., Sanez, C., Aliaga, E., and Aceituno, C. 2007. Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp. *Journal of Arid Environments*, 68: 534–545.
- Seshadri, R., Weiss, J., Hulbert, G.J., and Mount, J. 2003. Ultrasonic processing influences rheological and optical properties of high- methoxyl pectin dispersions. *Food hydrocolloids*, 17: 191-197.
- Simas-Tosin, F.F., Barraza, R.R., Petkowicz, C.L.O., Silveira, J.L.M., Sasaki, G.L., Santos, E.M.R., Gorin, P.A.J., and Iacomini, M. 2010. Rheological and structural characteristics of peach tree gum exudates. *Food Hydrocolloids*, 24: 486–493.
- Singh, U. 2001. Functional properties of grain legume flours. *Journal of Food Science and Technology*, 38: 191–199.
- Singthong, J., Ningsanond, S., and Cui, S.W. 2009. Extraction and physicochemical characterisation of polysaccharide gum from Yanang (*Tiliacora triandra*) leaves. *Food Chemistry*, 114: 1301-1307.
- Sit, N., Misra, S., and Deka, S. Ch. 2013. Yield and Functional Properties of Taro Starch as Affected by Ultrasound. *Food Bioprocess Technology*, DOI 10.1007/s11947-013-1192-7.
- Tiwari, B.K., Muthukumarappan, K., O'Donnel, C.P., and Cullen, P.J. 2010. Rheological properties of sonicated guar, xanthan and pectin dispersions. *International Journal of Food Properties*, 13: 223-233.
- Tomasik, P. 2004. Plant and algal gums and mucilages. In *Chemical and functional properties of food saccharides*. CRC press, Boca Raron, Florida, 231-254.
- Tsochatzidis, N. A., Guiraud, P., Wilhelm, A. M., and Delmas, H. 2001. Determination of velocity, size and concentration of ultrasonic cavitation bubbles by the phase-Doppler technique. *Chemical Engineering Science*, 56: 1831–1840.
- Vardhanabhuti, B. and Ikeda, S. 2006. Isolation and characterization of hydrocolloids from monoi (*Cissampelospareira*) leaves. *Food Hydrocolloids*, 20: 885-891.
- Vilkhu, K., Mawson, R., Simons, L., and Bates, D. 2008. Applications and opportunities for ultrasound assisted extraction in the food industry. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 9: 161–169.
- Wang, Q., Ellis, P. R., and Ross-Murphy, S. B. 2003. Dissolution kinetics of guar powders-II. Effects of concentration and molecular weight. *Carbohydrate Polymers*, 53: 75–83.
- Wang, Q., Sun, Y., Yang, B., Wang, Z.H., Liu, Y., Cao, Q., Sun, X., and Kuang, H. 2014. Optimization of polysaccharides extraction from seeds of *Pharbitis nil* and its anti-oxidant activity. *Carbohydrate Polymers*, 102: 460-466.
- Wang, Zh. M., Cheung, Y. Ch., Leung, P. H., and Wu, J. Y. 2010. Ultrasonic treatment for improved solution properties of a high-molecular weight exopolysaccharide produced by a medicinal fungus. *Bioresource Technology*, 101: 5517–5522.
- Whistler, R.L., and Bemiller, J.N. 1993. *Industrial Gums: polysaccharides and their derivatives*, Third edition, Academic press, 244-246.
- Wu, Y., Cui, S. W., Tang, J., and Gu, X. 2007. Optimization of extraction process of crude polysaccharides from boat-fruited *sterculia* seeds by response surface methodology. *Food Chemistry*, 105: 1599–1605.
- Ye, C. L., and Jiang, C. J. 2011. Optimization of extraction process of crude polysaccharides from *Plantago asiatica* L. by response surface methodology. *Carbohydrate Polymers*, 84: 495–502.
- Zhang, H.Q., Barbosa-Cánovas, G.V., and Balasubramaniam, V.M. 2011. *Physicochemical Effects of High-Intensity Ultrasonication on Food Proteins and Carbohydrates* in Nonthermal Processing Technologies for Food. Blackwell Publishing, 109-130.
- Zhang, M., Zhang, L., Cheung, P. C. K., and Ooi, V. E. Ch. 2004. Molecular weight and anti-tumor activity of the water-soluble polysaccharides isolated by hot water and ultrasonic treatment from the sclerotia and mycelia of *Pleurotus tuber-regium*. *Carbohydrate Polymers*, 56: 123-128.
- Zou, Y., Chen, X., Yang, W., and Liu, Sh. 2011. Response surface methodology for optimization of the ultrasonic extraction of polysaccharides from *Codonopsis pilosula* Nannf. var. *modesta* L.T. Shen. *Carbohydrate Polymers*, 84: 503-508.



Investigation of functional properties of quince seed mucilage extracted by ultrasound

A. Farahmand¹, M. Varidi^{2*}, A. Koocheki³

Received: 2014.10.25

Accepted: 2015.07.04

Introduction: Exploiting natural substances with dual or multiple functionalities is getting more attention in food industry due to the requirement from the health-conscious consumers and the trends for sustainable environment. Hydrocolloids are high molecular weight macromolecules that can be easily dissolved and dispersed in water under appropriate conditions. They can modulate rheological properties of foods, and are generally used as food thickeners, texture modifier, stabilizers and emulsifiers for various applications. Mucilage is a high molecular weight polyuronides consisting of sugar and uronic acid units. It is partially soluble in water and can form highly viscous solution. It exhibits hampering effect on the diffusion of glucose, help to postpone the absorption and digestion of carbohydrates. The mucilage extracted from the seeds of the quince fruit contained cellulose micro-fibrils strongly associated with a glucuronoxylan possessing a very high proportion of glucuronic acid residues. Analysis of quince seed mucilage (QSM) has shown the presence of more cellulosic fraction and hydrolysable polysaccharide. Quince seed mucilage is one of the endemic hydrocolloids, which due to high viscosity, its extraction needs a method to reduce the extraction time, energy consumption and especially raise the extraction efficiency. The traditional extraction method of polysaccharide from plant tissues are maceration, mechanical rabbling and heat reflux. These extraction methods depend largely on energy input and agitation to improve the solubility and mass transfer efficiency of polysaccharides. Usually, the conventional extraction method requires long extraction time and high extraction temperature with low extraction yield, but high energy consumption. Ultrasound in combination with conventional extraction is a potential technique, which is a fully reproducible food process, completed in shorter time with high reproducibility, reduced processing cost, simplified manipulation and work-up. To achieve this goal, in this study ultrasound-assisted extraction (UAE) as a novel extraction method was used.

Materials and Methods: Quince seed used in this study was purchased from a local market (KhorasanRazavi, Mashhad). They were cleaned manually by removing the foreign matter such as stones, dirt and broken seeds. They were packed in hermetic plastic vessels and stored at 5°C until further use. For mucilage extraction, first conventional extraction was optimized to select the best hydration conditions and after that UAE (24 KHz probe and 400 W power) was performed at three different levels of intensity (20, 60 and 100%) and times (5, 15 and 30 min). All chemicals used were analytical grades. Yield value of hydrocolloid was calculated by dividing the weight of dried hydrocolloid by the weight of initial dry seeds. Emulsion heat stability was determined by the method described in previous studies. In order to measuring the water absorption capacity (WAC), 0.05 g of mucilage was added to deionized water until QSM was completely wet (~ 10ml). The tubes were then centrifuged at 1600×g for 10 min. Excess water was discarded and residue was weighted. Apparent viscosity of QSM solution with 0.1% (w/v) concentration was measured using a rotational viscometer (Brookfield, DV- III, USA). Shear rate increased linearly from 2.5 - 35 s⁻¹ at 25°C. For measuring the foam stability and emulsion heat stability, the mucilage dispersions were prepared at 0.25 and 0.5 (w/v) respectively, and kept overnight at 4°C. After complete hydration, 2% (w/v) egg white powder was added and then foamed by whipping at 8600 rpm for 2 min using a disperser.

Results and Discussion: Optimized conditions of conventional extraction were 45 min, 47°C and 32.5: 1 water to seed ratio. The results showed that extraction at 30 min with 100% intensity raised the extraction yield to 42.7% in comparison with control sample. Improvement in hydrocolloid extraction by ultrasound is attributed

1- M.Sc. Student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

2- Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

3- Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

(*- Corresponding Author Email: m.varidi@um.ac.ir)

to ultrasound pressure wave diffusion which results in cavitation phenomenon. Amplitude level and exposure time had a significant ($p < 0.01$) effect on the consistency coefficient (k), flow behavior (n) and yield stress. Herschel-bulkley model was selected as the best rheological model to describe the flow behavior. Solubility of samples varied by 66-92% due to the effect of ultrasound waves on the structure of mucilage, but this parameter was increased in comparison to the control sample. The highest foam stability was observed at 60% intensity. The efficacy of a stabilizer is dependent on the rate of its absorption at the phase boundary. Moreover molecular weight (MW) of ultrasound- assisted extracted mucilage was reduced because of pressure fluctuations caused by sonication process. As a result, the exposure of hydrocolloid dispersions to high shear force could lead to the cleavage of macromolecules. A reduction in the molecular weight of QSM could increase the rate of absorption on the foam bubbles. UAE increased the foam stability by 17.31%. Although Water Absorption Capacity (WAC) was reduced especially at higher intensities or times, this parameter was higher in all treatments compared to control sample. WAC depends on the interaction between water and compound, amount of hydration positions or active side (OH). Extraction by ultrasound could release hydroxyl groups, so WAC of ultrasound extracted samples increased compared to control sample. However, this parameter reduced in strong treatments because of distortion of polysaccharide structure. These results showed that UAE due to its positive effect on the functional properties of QSM could be introduced as a suitable extraction method.

Keywords: Extraction, Functional properties, Quince seed mucilage, Ultrasound