

توسعه و آزمون حسگر دی‌الکتریک استوانه‌ای برای اندازه‌گیری غلظت قند شربت چغندر قند

حامد خلیلیان^۱، مهدی قاسمی و رنامخواستی^{۲*}، مجتبی نادری بلداجی^۳، سجاد رستمی^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۲. استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۳. استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۴. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۵/۱۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۱۰/۱۵)

چکیده

اندازه‌گیری و پایش غلظت قند شربت چغندر قند به شکل پیوسته و در مراحل مختلف پخت و تغلیظ یکی از نیازهای اساسی صنعت شکر می‌باشد. در این مطالعه یک نمونه حسگر دی‌الکتریک استوانه‌ای با قابلیت توسعه برای اندازه‌گیری برخط غلظت قند شربت چغندر قند ساخته شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. این حسگر متشکل از یک استوانه فولادی و مغزی به عنوان قطب‌های خازن می‌باشد که توسط کابل هم‌محور به دستگاه‌های ژنراتور و تحلیل‌گر طیف متصل می‌شود. با آزمون آزمایشگاهی، پاسخ حسگر در پنج غلظت مختلف شربت چغندر قند با درصدهای بریکس ۲۶/۵، ۳۷/۹، ۴۸/۷، ۵۴/۱ و ۶۲ آزمون شد و طیف‌های دامنه بر حسب فرکانس (A-F) در بازه ۱۵۰-۰ MHz بدست آمد. نتایج نشان داد که فرکانس تشدید در تناوب‌های اول و دوم با درصد بریکس رابطه قوی خطی با شیب مثبت دارد. به طور معکوس این ارتباط قوی با ضرایب تبیین ۰/۹۹ و ۰/۹۸ به ترتیب برای تناوب اول و دوم تشدید بین ضریب دی‌الکتریک شربت و درصد بریکس حاصل شد به طوری که با افزایش درصد بریکس ضریب دی‌الکتریک کاهش یافت. یافته‌های این مطالعه نشان داد که روش دی‌الکتریک می‌تواند یک روش توانمند و کاربردی در اندازه‌گیری درصد بریکس شربت چغندر قند در کارخانه‌های قند باشد.

واژه‌های کلیدی: حسگر دی‌الکتریک، شربت چغندر قند، درصد بریکس، فرکانس تشدید.

مقدمه

موجود در صد گرم محلول (شربت چغندر قند) می‌باشد. ساکارز از مهمترین قندهای موجود در ریشه چغندر قند بوده که حدود ۹۵٪ از کل قند موجود در این محصول را شامل می‌شود. از جمله فناوری‌هایی که تا کنون در صنعت شکر برای اندازه‌گیری آزمایشگاهی و یا برخط غلظت قند بکار گرفته شده، استفاده از حسگرهای رفرکتومتر است که با اندازه‌گیری زاویه شکست نور عبور داده شده از طریق محلول، درجه بریکس اندازه‌گیری می‌شود. از جمله معایب این فناوری هزینه اولیه و نگهداری بالا و همچنین نیاز به کالیبراسیون‌های دوره‌ای جهت اندازه‌گیری دقیق می‌باشد. از دیگر روش‌هایی که می‌تواند در صنعت شکر به کار گرفته شود، استفاده از حسگرهای دی‌الکتریک است که ارزان‌تر و ساده‌تر نسبت به روش رفرکتومتری می‌تواند قابلیت اندازه‌گیری غلظت قند شربت چغندر قند به صورت برخط را نیز داشته باشد (Farokhi, 2012).

دی‌الکترومتری یکی از روش‌های طیف‌سنجی دی‌الکتریک است که در این روش پارامترهای مختلف فیزیکی از ماده مانند قطبش، گذردهی و هدایت الکتریکی در پاسخ یک جریان متناوب در یک طیف فرکانسی وسیع اندازه‌گیری می‌شود (Mireei, 2016). از حسگرهای رایجی که برای اندازه‌گیری

صنعت قند یکی از مهمترین صنایع درگیر با تولید مواد غذایی است. در بین ۱۱۸ کشور تولیدکننده شکر، تنها ۹ کشور از جمله ایران از نیشکر و چغندر قند، ۳۸ کشور به تنهایی از چغندر قند و ۷۱ کشور فقط از نیشکر، شکر تولید می‌کنند و لذا وابستگی جهانی در حدود ۷۵٪ به نیشکر و ۲۵٪ به چغندر قند است (Harland et al., 2006). آب در حدود ۷۰ تا ۸۰٪ وزن خشک گیاه چغندر قند را تشکیل می‌دهد و در تمام اندام‌های گیاه موجود بوده و عامل اصلی انتقال قند از برگ‌ها به ریشه می‌باشد. مقدار قند در ارقام اصلاح شده به ۱۶ تا ۲۰٪ وزن گیاه می‌رسد. باقی‌مانده گیاه از فیبر یا مواد خشکی تشکیل شده است. به دلیل متغیر بودن نسبت این مقادیر، شاخص‌های عیار به منظور ارزش‌گذاری در هنگام خرید چغندر قند از کشاورزان و یا صادرات آن حائز اهمیت می‌باشد. درجه یا درصد بریکس یکی از معیارهای متداول سنجش عیار چغندر قند است. درصد بریکس نشان دهنده درصد وزن مواد جامد محلول (Soluble solids)

* نویسنده مسئول: ghasemymahdi@gmail.com

طیف‌های دی‌الکتریک مورد استفاده قرار می‌گیرند می‌توان به حسگرهای خازنی یا ماکروویوی اشاره کرد (Hoog, 2014). از جمله مزایای استفاده از این حسگرها صحت و دقت آن‌ها و قابلیت بکارگیری آن‌ها برای اندازه‌گیری‌های غیرمخرب مواد غذایی و کشاورزی است.

مرور منابع علمی حاکی از توسعه و استفاده روزافزون روش‌های دی‌الکتریک در فناوری غذایی می‌باشد. در مطالعه‌ای توسط Guo et al. (2007)، رابطه محتوای رطوبت خربزه و محتوای مواد جامد محلول (به عنوان شاخصی از محتوای قند خربزه) با ثابت دی‌الکتریک و ضریب اتلاف معادل در سه رقم خربزه در هنگام رسیدگی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در محدوده فرکانسی ۱۰ مگاهرتز تا ۱/۸ گیگاهرتز و بوسیله پروب با کابل هم‌محور و مدار انتها باز در دو مرحله صورت گرفت. نتایج نشان دهنده یک رابطه خطی با ضریب تبیین ۰/۹۵ از تقسیم پارامترهای ضریب گذردهی دی‌الکتریک و ضریب اتلاف دی‌الکتریک، بر میزان مواد جامد محلول خربزه بود. نتایج نشان داد که ضریب گذردهی دی‌الکتریک و ضریب اتلاف برای خربزه کامل و قسمتی از بافت داخلی آن، با افزایش فرکانس به صورت خطی کاهش یافت. در مطالعه‌ای دیگر توسط Zhu et al. (2011) اندازه‌گیری‌های دی‌الکتریک شیره سیب، گلابی، پرتقال، انگور و آناناس در محدوده فرکانسی ۲۰ تا ۴۵۰۰ مگاهرتز در دمای ۱۵ تا ۹۵ درجه سلسیوس انجام گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش فرکانس، ثابت دی‌الکتریک شیره میوه‌ها کاهش یافت. همچنین فاکتور افت نیز با افزایش فرکانس روند نزولی داشت و در بازه فرکانسی ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ مگاهرتز کمترین مقدار خود را نشان داد. ثابت دی‌الکتریک با افزایش دما به صورت خطی و یکنواخت روند نزولی داشت اما فاکتور افت با افزایش دما تا حدود فرکانس ۱۰۰۰ مگاهرتز سیر صعودی و از ۳۰۰۰ مگاهرتز به بعد سیری نزولی داشت. این مطالعه نشان داد که خاصیت دی‌الکتریک می‌تواند به خوبی مواد جامد محلول (درصد بریکس) و pH را در شیره میوه‌ها پیش‌بینی کند. Guo et al. (2015) به منظور بررسی امکان طیف‌سنجی دی‌الکتریک به عنوان یک روش غیر مخرب جهت تعیین میزان مواد جامد محلول و سفتی بافت میوه گلابی در طول دوره رسیدن، مطالعه‌ای در ۲۰۱ فرکانس مجزا از ۲۰ تا ۴۵۰۰ مگاهرتز بوسیله یک پروب انتها باز هم‌محور با استفاده از دستگاه تحلیل‌گر بردار انجام دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که طیف‌سنجی دی‌الکتریک به همراه شبکه‌های هوشمند عصبی برای پیش‌بینی شاخص‌های میزان مواد جامد محلول و سفتی بافت در طول دوره رسیدن میوه گلابی روی درخت مناسب

است. در مطالعه‌ای دیگر توسط Bagheri (2015) و Mireei et al. (2016)، طیف‌نگاری توان مصرفی دی‌الکتریک با استفاده از روش صفحات موازی در محدوده ۱ تا ۱۰۰ مگاهرتز برای تخمین رطوبت خرما ارزیابی شد که نتایج دقیقی نشان داد. با روشی مشابه مطالعه‌ای در محدوده فرکانس ۱ تا ۱۰ مگاهرتز بر روی ساقه نیشکر به صورت غیرمخرب انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد که روش دی‌الکتریک یک روش توانمند و دقیق در اندازه‌گیری غیرمخرب محتوای رطوبت، مواد جامد محلول (درصد بریکس) و ساکارز (درصد پل) نیشکر می‌باشد (Naderi-Boldaji et al., 2015).

مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که روش دی‌الکتریک می‌تواند به نحو مطلوبی در اندازه‌گیری محتوای قند محصولات غذایی و کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد. لذا هدف از این مطالعه به طور کلی توسعه یک حسگر دی‌الکتریک با قابلیت عبور مایعات برای اندازه‌گیری محتوای قند شربت چغندر قند می‌باشد که برای اولین بار ارائه می‌گردد. از آنجا که اندازه‌گیری‌های دی‌الکتریک اساساً تابعی از فرکانس می‌باشد، روش طیف‌نگاری دی‌الکتریک در محدوده فرکانس ۰ تا ۱۵۰ مگاهرتز با استفاده از یک خازن استوانه‌ای هم‌محور انجام شد. سوال اصلی تحقیق حاضر این است که آیا حسگر دی‌الکتریک استوانه‌ای قادر به تشخیص تغییرات درجه بریکس شربت چغندر قند می‌باشد؟ توسعه و استفاده از این حسگر برای اندازه‌گیری در حال جریان مایعات غذایی از اهداف کاربردی این مطالعه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

اصول نظری حسگر دی‌الکتریک

گذردهی دی‌الکتریک مواد با یک عبارت مختلط (رابطه ۱) بیان می‌شود که جزء حقیقی آن بیانگر ضریب گذردهی دی‌الکتریک (ϵ'_r) یا قابلیت همسویی دوقطبی‌های موجود در ماده با میدان الکتریکی و جز موهومی آن (ϵ''_r)، ضریب افت یا میزان انرژی تلف شده به شکل حرارت در ماده دی‌الکتریک می‌باشد. تغییر در خصوصیات و ترکیب ماده موجب تغییر در ضرایب دی‌الکتریک ماده شده است.

$$\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r \quad (\text{رابطه ۱})$$

با بهره‌گیری از تحقیقات انجام شده در زمینه حسگرهای دی‌الکتریک، می‌توان به نتایج کاربردی استفاده از تشدید

برای یک تشدید ایده‌آل (فرکانس بدون میرایی)، فرکانس تشدید (f_{res}) در معادله مدار باز ($\gamma/4$) به صورت زیر تعریف می‌شود (Hoog, 2014):

$$f_{res} = \frac{2n-1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{c(2n-1)}{4l\sqrt{\epsilon_r\mu_r}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

n : دوره تناوب فرکانس تشدید

f_{res} : فرکانس تشدید (Hz)

L : اندوکتانس بر واحد طول (H/m)

C : ظرفیت خازنی بر واحد طول (F/m)

c : سرعت نور در خلا (m/s)

μ_r : خاصیت مغناطیسی نسبی الکترو (-)

ϵ_r : خاصیت گذردهی نسبی دی‌الکتریک (-)

شکل ۴-الف طیف A-F را در حالت ایده‌آل و شکل ۴-ب

آن را در حالت میرا نشان می‌دهد. در هر دوره تناوب، طیف دارای یک فرکانس تشدید است که در آن نقطه دامنه به کمترین میزان می‌رسد. با توجه به نوع سامانه اندازه‌گیری، تعداد و فاصله توالی فرکانس‌های تشدید در یک طیف متفاوت می‌باشد. در صورتی که تشدید ایده‌آل باشد (۴-الف)، مقدار تغییرات دامنه در نقطه تشدید در تناوب‌های متوالی به یک میزان است. اما در صورتی که تشدید میرا باشد (۴-ب)، در هر دوره تناوب مقدار تغییرات دامنه کمتر از تناوب قبلی بوده تا جایی که تغییرات به صفر رسیده و طیف میرا گردد. زمانی که فرکانس توسط دستگاه ژنراتور افزایش می‌یابد، انرژی جنبشی بین مولکول‌های دوقطبی ماده بین حسگر نیز افزایش یافته تا جایی که به بیشترین حد خود رسیده و پیوند متلاشی می‌شود. در این لحظه طبق تعریف (تمایل مولکول‌ها به نوسان با بیشینه دامنه در فرکانس‌هایی خاص)، پدیده تشدید در طیف دی‌الکتریک رخ می‌دهد.

آزمون‌های شربت چغندر قند

جهت آزمون حسگر دی‌الکتریک، شربت چغندر قند در پنج غلظت قند مختلف با درصد‌های بریکس ۲۶/۵، ۳۷/۹، ۴۸/۷، ۵۴/۱ و ۶۲ از کارخانه قند اصفهان تهیه گردید و هر کدام به صورت مجزا درون محفظه حسگر ریخته شده و پس از اتصال حسگر به سامانه، فرکانس‌های مختلف از ۰ تا ۱۵۰ مگاهرتز تولید و جاروب شده و نتایج به صورت نمودارهای فرکانس (MHz) بر حسب دامنه (dbm) ثبت گردید.

درجه بریکس نمونه‌های شربت با استفاده از دستگاه

رفرکتومتر (Ceti Belgium, Quartz, Hong Kong) اندازه‌گیری شد. بدین منظور دو تا سه قطره از محلول شربت روی لنز دستگاه ریخته شد. با عبور نور تکفام از نمونه و اندازه‌گیری زاویه

کننده‌های هم‌محور به صورت اندازه‌گیری‌های در خط^۱ و بر خط^۲ اشاره نمود (Hoog et al., 2012). حساسیت این حسگرها تا حد زیادی به خواص دی‌الکتریک و هندسه حسگر (هندسه الکترودها و فاصله بین آن‌ها) بستگی دارد (Hoog et al., 2012). پاسخ این نوع حسگر به صورت طیف دامنه-فرکانس (A-F) نمایش داده می‌شود. طیف A-F بیانگر اطلاعاتی در مورد ماده دی‌الکتریک درون حسگر و همچنین فرکانس تشدید آن ماده می‌باشد که با ضریب دی‌الکتریک ماده ارتباط تحلیلی دارد. به طور کلی این روش یک روش آسان برای بدست آوردن خواص دی‌الکتریک بدون استفاده از مواد شیمیایی و تغییرات فیزیکی است.

ساختار حسگر دی‌الکتریک استوانه‌ای

در این پژوهش یک حسگر خازنی استوانه‌ای هم‌محور با هدف اندازه‌گیری فرکانس تشدید دی‌الکتریک و ارتباط آن با غلظت قند شربت چغندر قند توسعه داده شد. به دلیل نیاز به فلزی با رسانایی بالا و همچنین مقاوم در برابر رطوبت و عملیات پرداخت و جوشکاری، از استیل (SAE 304) برای ساخت حسگر استوانه‌ای استفاده گردید. برای ساخت حسگر، استوانه‌ای به طول ۲۵۰، قطر خارجی ۲۵ و ضخامت ۱ میلی‌متر برش داده و پرداخت شد. همچنین این حسگر شامل یک مغزی از جنس استیل به قطر ۴ میلی‌متر که در مرکز استوانه قرار دارد و یک رابط بی‌ان‌سی^۳ است که از طریق کابل‌های هم‌محور به دستگاه‌های ژنراتور و تحلیل‌گر طیف (اسپکتروم آنالایزر) وصل می‌شود. مغزی حسگر بر روی یک قطعه از جنس تفلون نصب شده که ارتباط الکتریکی مغزی و استوانه را قطع می‌نماید. شکل ۱ طرح‌واره‌ای از این حسگر را در حالت انفجاری (الف) و منسجم (ب) نشان می‌دهد.

سامانه اندازه‌گیری دی‌الکتریک

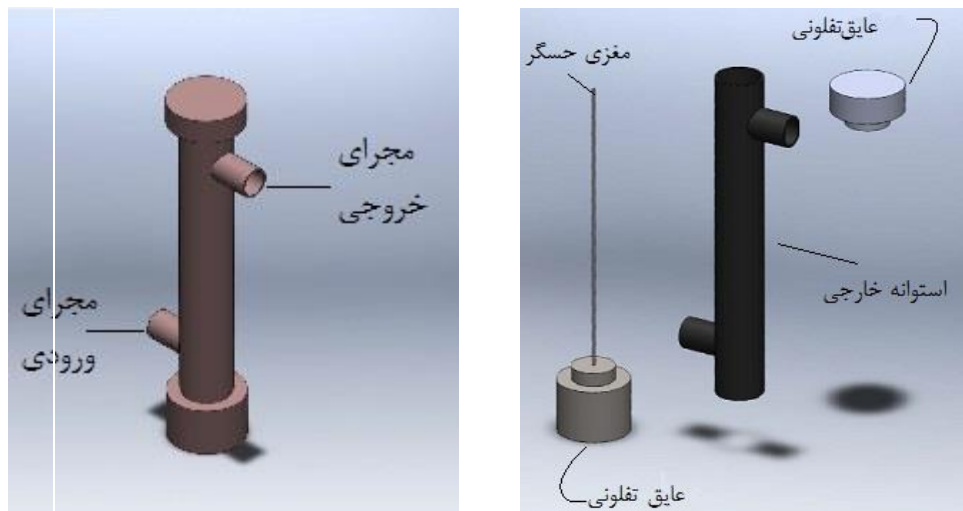
سامانه اندازه‌گیری شامل دستگاه ژنراتور (OWON, AG-4151, Hong Kong) می‌باشد که توسط کابل‌های هم‌محور به دستگاه تحلیل‌گر طیف (GW-instek, GPS-827, Taiwan) متصل می‌شود. حسگر توسط یک اتصال تی (T) در بین این دو دستگاه قرار گرفته و الکترودهای آن به قطب مثبت و استوانه بیرونی به قطب منفی مدار متصل می‌شود. شکل ۲ طرح‌واره‌ای از سامانه اندازه‌گیری و شکل ۳ نحوه اتصال حسگر در سامانه را نشان می‌دهد.

1. In-line

2. On-line

3. BNC Connector

شکست نور درجه بریکس محاسبه شد (Bionutrient Food Association, 2015).



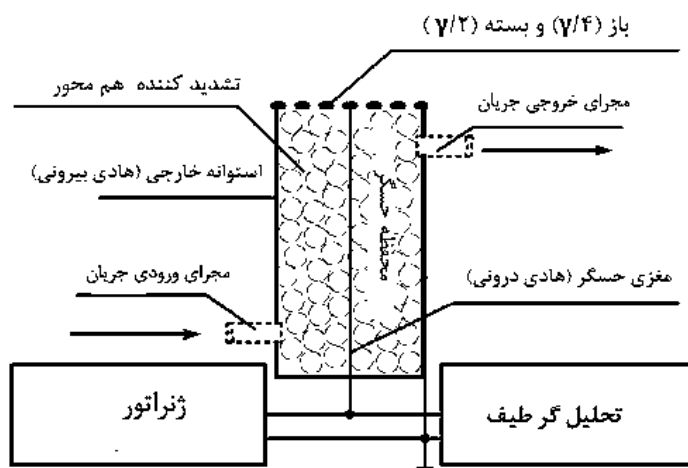
(ب)

(الف)

شکل ۱. طرحواره حسگر دی الکتریک در حالت انفجاری (الف) و حالت منسجم (ب)



شکل ۲. طرحواره سامانه اندازه گیری و نحوه اتصال حسگر دی الکتریک

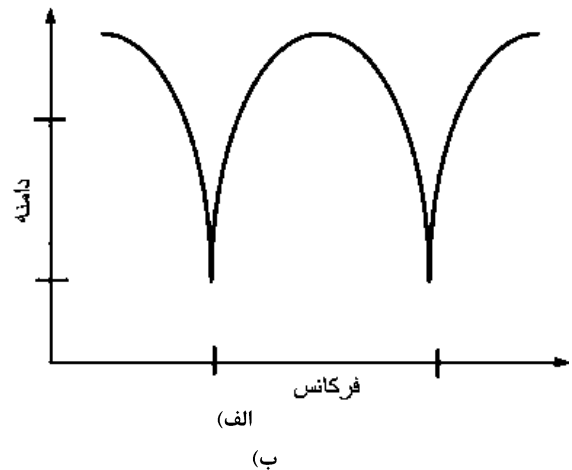
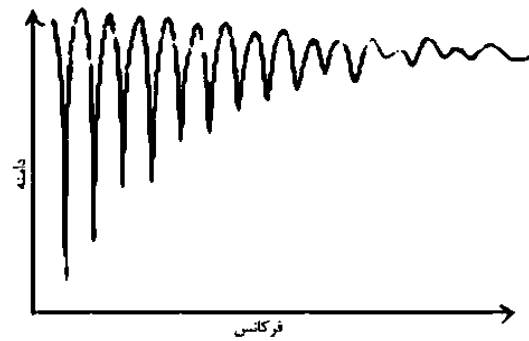


شکل ۳. نحوه اتصال حسگر دی الکتریک به ژنراتور و تحلیل گر طیف (Hoog, 2014)

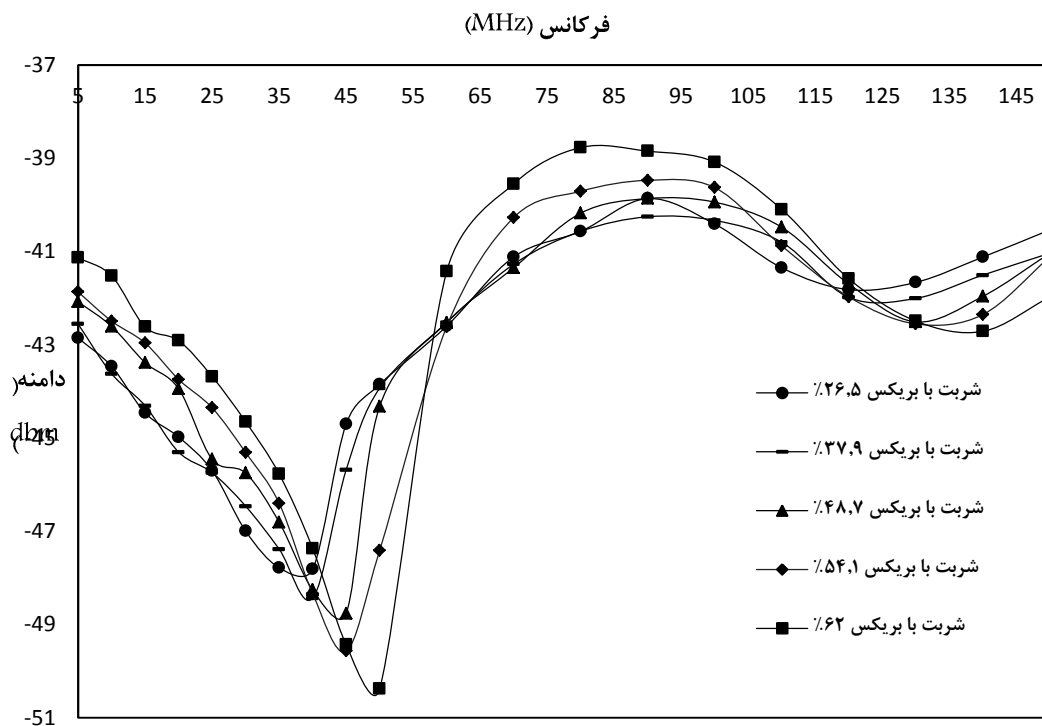
نتایج و بحث

شکل ۵ طیف‌های A-F را برای پنج نمونه شربت آزمون شده را نشان می‌دهد. در محدوده فرکانس آزمون شده، دو فرکانس تشدید مشاهده می‌شود که در تناوب دوم تشدید تغییرات دامنه نسبت به تناوب اول کمتر می‌باشد که حاکی از تشدید میرا شونده می‌باشد. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد بریکس نمونه‌ها، فرکانس تشدید در هر دو تناوب افزایش یافته است.

شکل ۶ نتایج آزمون تکرار پذیری حسگر در دو سطح بریکس ۲۶/۵ و ۶۲٪ را نشان می‌دهد. واضح است که طیف‌ها در هر بار تکرار تغییرات بسیار ناچیزی داشته و فرکانس‌های تشدید یکسانی حاصل شده است.



شکل ۴. طیف A-F برای الف) تشدید ایده‌آل و ب) تشدید میرا



شکل ۵. طیف‌های دامنه-فرکانس (A-F) شربت چغندر قند در غلظت‌های مختلف

بدست آمد. همچنین، افزایش فرکانس با درجه بریکس در تناوب دوم شدیدتر از تناوب اول بود که شیب روابط بیانگر این امر می‌باشد. با افزایش فرکانس از میزان خطا و پارازیت‌های

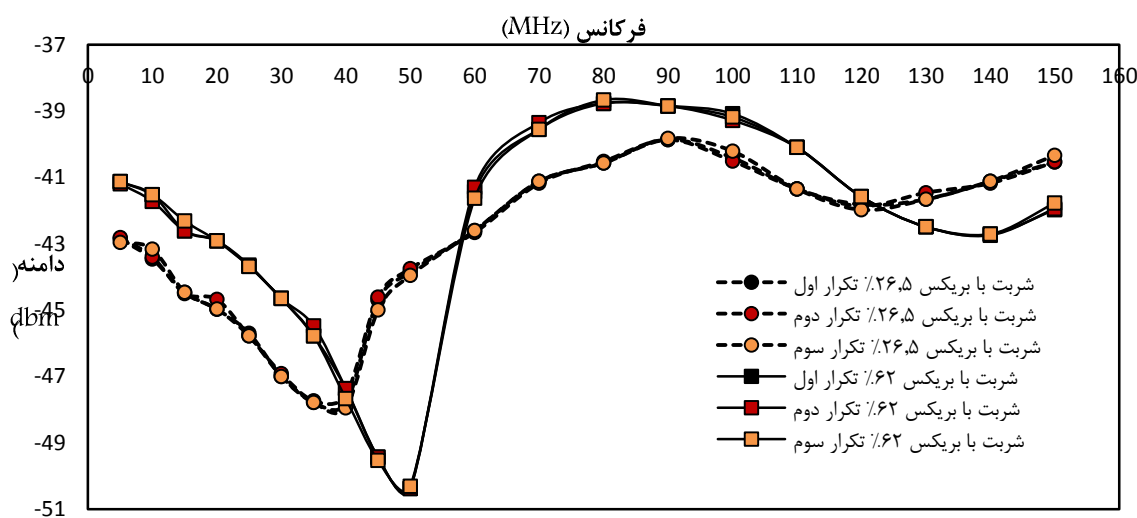
شکل ۷ همبستگی بین فرکانس تشدید و درجه بریکس را در دو تناوب اول و دوم نشان می‌دهد. ضرایب تبیین (R^2) همبستگی برای تناوب اول و دوم به ترتیب مقادیر ۰/۹۷ و ۰/۹۹

جدول ۱. مقادیر فرکانس تشدید و ضریب دی‌الکتریک در شربت با درجه‌های

| بریکس مختلف | | | | |
|-------------|-----------------|-------------------|--------------|--------------|
| Brix | f_{res} (MHz) | $f_{2,res}$ (MHz) | ϵ_1 | ϵ_2 |
| ۶/۵ | ۳۹/۵ | ۱۲۰ | ۷/۶۸ | ۵۶/۲۵ |
| ۷/۹ | ۴۱/۲ | ۱۲۳ | ۳/۰۲ | ۵۳/۵۳ |
| ۸/۷ | ۴۳ | ۱۲۸ | ۸/۶۷ | ۴۹/۷۳ |
| ۴/۱ | ۴۴ | ۱۳۰ | ۶/۴۸ | ۴۷/۹۲ |
| ۶۲ | ۴۵/۵ | ۱۳۵ | ۳/۴۷ | ۴۴/۴۵ |

* ضریب گذردهی دی‌الکتریک تناوب اول و دوم

فرکانسی در روند اندازه‌گیری کاسته می‌شود (Hoog, 2014). با استفاده از رابطه ۲، ضریب گذردهی دی‌الکتریک برای نمونه‌ها با درصد بریکس متفاوت محاسبه شد. بدین منظور مقادیر ثابت-های L و μ_r برای جنس استیل به ترتیب ۲۵۰ میلی‌متر و ۱ جایگزین شد (Hoog, 2014) و سرعت نور (c) برابر 3×10^8 در نظر گرفته شد. جدول ۱ مقادیر اندازه‌گیری شده فرکانس تشدید و مقادیر محاسبه شده ضریب دی‌الکتریک در تشدید اول و دوم را گزارش می‌دهد.



شکل ۶. نتایج آزمون تکرارپذیری حسگر در دو سطح بریکس ۲۶/۵ و ۶۲/۰.

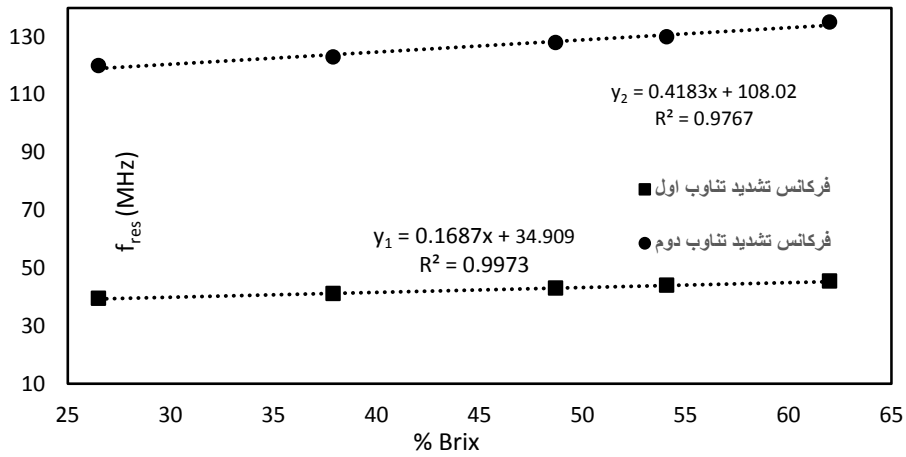
دی‌الکتریک محلول حاصل نسبت به آب خالص تفاوت خواهد داشت. به طور کلی بالا رفتن درصد ساکارز در آب خالص افت در ثابت دی‌الکتریک را در پی خواهد داشت (Kudra, 1992). نکته شایان توجه اینکه مقدار ضریب گذردهی دی‌الکتریک بدست آمده برای فرکانس تشدید اول با مقدار آن در فرکانس تشدید در تناوب بعدی مقادیر مشابهی است (شکل ۹) که تایید کننده صحت محاسبات می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

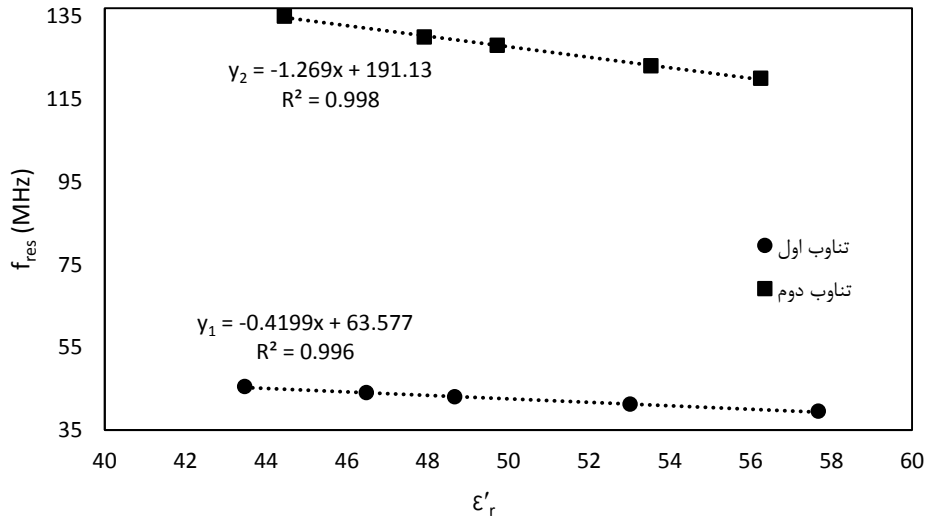
در این مطالعه یک حسگر دی‌الکتریک استوانه‌ای برای اندازه‌گیری غلظت قند (بر حسب درصد بریکس) شربت چغندر قند توسعه داده شد. نتایج نشان داد که با افزایش درصد بریکس شربت، فرکانس تشدید دی‌الکتریک افزایش و ضریب گذردهی دی‌الکتریک کاهش می‌یابد. مدل رگرسیون خطی در دامنه ۰ تا ۱۵۰ مگاهرتز توانست ضریب گذردهی دی‌الکتریک برای شربت چغندر قند را با ضرایب تبیین ۰/۹۹ (مربوط به تناوب اول تشدید) و ۰/۹۸ (مربوط به تناوب دوم تشدید) در درصدهای بریکس متفاوت از شربت پیش‌بینی کند. نتایج نشان

شکل ۸ رابطه بین فرکانس تشدید و ضریب گذردهی دی‌الکتریک را نشان می‌دهد که با افزایش ضریب گذردهی دی‌الکتریک فرکانس تشدید کاهش یافته است. ضرایب تبیین همبستگی برای تناوب اول و دوم به ترتیب برابر مقادیر ۰/۹۹ و ۰/۹۹ بود. همچنین شکل ۹ نشان می‌دهد که درصد بریکس با مقدار ضریب گذردهی دی‌الکتریک رابطه معکوس دارد که ضرایب تبیین آن به ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۹۸ برای تناوب اول و دوم است. توجه این پدیده را می‌توان در افزایش تعداد پیوندهای میان مولکول‌های قند و آب و کاهش تعداد مولکول‌های دوقطبی آزاد آب در شربت غلیظ‌تر بیان نمود (Skierucha et al., 2012). این نتیجه توسط دیگر محققین نیز تایید شده است (Tulasidas et al., 1995; Guo et al., 2007; Tanaka et al., 2008; Guo et al., 2010; et al., 2011; Angkawisittpan & Guo et al., 2011; Jackson & Jayanthi, 2012; Hayati et al., 2013; Manasri, 2012; Naderi Boldaji et al., 2015; Guo et al., 2015). طبق گزارش Venkatesh & Raghavan (2004) با حل شدن کربوهیدرات (نشاسته، قند و فیبر) در آب خالص، خواص

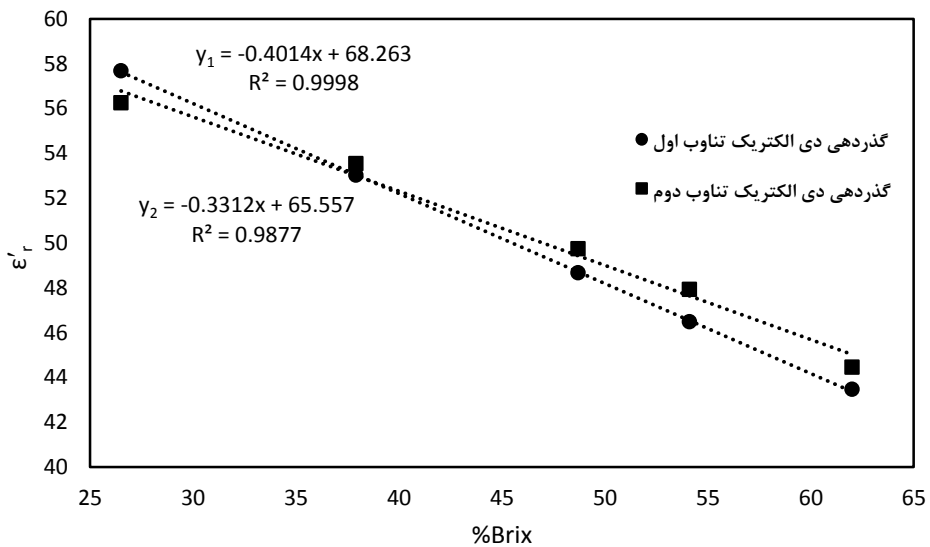
داد که ضریب دی‌الکتریک شربت چغندر قند با افزایش غلظت قند کاهش یافته



شکل ۷. فرکانس تشدید بر حسب درصد بریکس شربت چغندر قند



شکل ۸. فرکانس تشدید بر حسب ضریب گذردهی دی‌الکتریک



شکل ۹. ضریب گذردهی دی‌الکتریک بر حسب درصد بریکس

اندازه‌گیری پیشنهاد می‌شود که این حسگر برای اندازه‌گیری در حال عبور جریان شربت جهت پایش پیوسته غلظت در صنایع قند توسعه یابد. همچنین از این روش می‌توان در سایر صنایع غذایی از جمله آب‌میوه استفاده نمود.

طوری که در درجه بریکس ۶۰٪ به حدود ۴۵ می‌رسد که تفاوت زیادی با ضریب دی‌الکتریک آب خالص (حدود ۸۰) دارد. این نتایج توانایی حسگر توسعه داده شده در این تحقیق را برای اندازه‌گیری درصد بریکس شربت چغندر قند نشان می‌دهد. لذا با توجه به هزینه پایین این نوع حسگر و سادگی در روش

REFERENCES

- Angkawisittpan, N. & Manasri, T. (2012). Determination of sugar content in sugar solutions using interdigital capacitor sensor. *Measurement Science Review*, 12, 8-13.
- Bagheri, R., Mireei, A., Sadeghi, M., Masumi, A. & Mumkesh, Sh. (2015). Non-destructive dielectric method to measure moisture of date. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 45, 97-104, (In Farsi)
- Bionutrient Food Association. (2015). Brix. Retrieved January 17, 2016, from <https://bionutrient.org/bionutrient-rich-food/brix>
- Farokhi, F. (2012). Measure important chemical changes dilute & concentrated syrup storage in order to optimize the production of sugar & waste control, *National conference on food*, Islamic Azad University of Quchan, Iran.
- Guo, W., Fang, L., Liu, D. & Wang, Zh. (2015). Determination of soluble solids content & firmness of pears during ripening by using dielectric spectroscopy. *Computers & Electronics in Agriculture*, 117, 226-233.
- Guo, W., Liu, Y., Zhu, X. & Wang, Sh. (2011). Dielectric properties of honey adulterated with sucrose syrup. *Food Engineering*, 107, 1-7.
- Guo, W., Nelson, S. O., Trabelsi, S. & Kays, S. J. (2007). Dielectric properties of honeydew melons & correlation with quality. *Microwave Power & Electromagnetic Energy*, 41, 44-54.
- Guo, W., Zhu, X. & Nelson, S. O. (2010). Permittivities of watermelon pulp & juice & correlation with quality indicators. *Food Properties*, 16, 475-484.
- Harland, J. I., Jones, C. K. & Hufford, C. (2006) Sugar beet. In: Draycott, A. P. (ed.), Chicester, United Kingdom, Blackwell Publishing. 514 p.
- Hayati, A., Raoufat, M. H. & Kamgar, S. 2014. Feasibility of fruit capacitive characteristics for estimating sugar of apple. In *Proceedings of 8th National Congress on Agr., Machinery Eng. (Biosystem) & Mechanization*, 29-31 June, Ferdowsi University, Mashhad, Iran, pp.801-816. (In Farsi)
- Hoog, N. A., Olthuis, W., Mayer, M. J. J., Yntema, D., Miedema, H. & van-den-Berg, A. (2012). On-line fingerprinting of fluids using coaxial stub resonator technology. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 163, 90-96.
- Hoog, N. A. (2014). *Stub resonators transmission line based water sensors*. Ph. D. dissertation. University of Twente.
- Jackson, B. & Jayanthi, T. (2014). Determination of sucrose in raw sugarcane juice by microwave method. *Indian Journal of Science & Technology*, 7, 566-570.
- Kudra, T., Raghavan, G. S. V., Akyel, C., Bosisio, R. & van-de-Voort, F. R. (1992). Electromagnetic properties of milk & its constituents at 2.45 MHz. *International Microwave Power Institute Journal*, 27, 199-204.
- Mireei, A., Bagheri, R., Sadeghi, M. & Shahraki, A. (2016). Developing an electronic portable device based on dielectric power spectroscopy for non-destructive prediction of date moisture content. *Sensors and Actuators A*, 247, 289-297.
- Naderi-Boldaji, M., Fazeliyan-Dehkordi, M., Mireei, S. A. & Ghasemi-Varnamkhashti, M. (2015). Dielectric power spectroscopy as a potential technique for the non-destructive measurement of sugar concentration in sugarcane. *Biosystems Engineering*, 140, 1-10.
- Skierucha, W., Wilczek, A. & Szyplowska, A. (2012). Dielectric spectroscopy in agrophysics. *International Agrophysics*, 26, 187-197.
- Tanaka, F., Uchino, T., Hamanaka, D., Gregory-Atungulu, G. & Hung, Y. (2008). Dielectric properties of mirin in the microwave frequency range. *Food Engineering*, 89, 435-440.
- Tulasidas, T. N., Raghavan, G. S. V., van-de-Voort, F. & Girard, R. (1995). Dielectric properties of grapes & sugar solutions at 2.45 GHz. *Microwave Power & Electromagnetic Energy*, 30, 117-123.
- Venkatesh, M. S. & Raghavan, G. S. V. (2004). An overview of microwave processing & dielectric properties of agri-food materials. *Biosystems Engineering*, 88, 1-18.
- Zhu, X., Guo, W. & Wu, X. (2011). Frequency & temperature dependent dielectric properties of fruit juices associated with pasteurization by dielectric heating. *Food Engineering*, 109(2), 258-266.