

مقاله علمی - پژوهشی

توسعه و ارزیابی حسگر دی‌الکتریک مجاورتی برای اندازه‌گیری غیرمخرب غلظت قند چغندر قند

اعظم اسدی^۱، مجتبی نادری بلداجی^{۲*}، امین لطفعلیان^۳، مهدی قاسمی ورنامخواستی^۴
و سامان آبدانان مهدی‌زاده^۵

۱، ۲، ۳ و ۴- به ترتیب: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد؛ دانشیار؛ استادیار؛ و دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
۵- دانشیار گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، اهواز، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۹/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۱

چکیده

تعیین غلظت (عیار) قند برای ارزیابی کیفیت چغندر قند در کارخانه‌های قند اهمیت زیادی دارد و مبنای ارزش‌گذاری چغندر قند نیز محسوب می‌شود. در این مطالعه، با هدف برآورد درجه بریکس به عنوان یکی از شاخص‌های سنجش عیار قند چغندر، یک حسگر دی‌الکتریک مجاورتی توسعه داده شد و ارزیابی گردید. این حسگر از نوع کواکسیال انتها-باز بوده که از دو الکترود فلزی دایره‌ای هم‌مرکز تشکیل شده و با استفاده از آن طیف‌های دامنه بر حسب بسامد در بازه صفر تا ۱۵۰ مگاهرتز برای هر نمونه چغندر استخراج شد. به منظور ارزیابی حسگر، ۱۰۰ نمونه چغندر قند انتخاب و بریکس معیار در هر نقطه اندازه‌گیری با حسگر دی‌الکتریک، با استخراج عصاره از آن با استفاده از دستگاه فرکتومتر اندازه‌گیری شد. نتایج به دست آمده نشان داد که در محدوده‌های بسامدی ۵۰-۳۰ و ۱۴۰-۱۲۰ مگاهرتز، طیف‌های دی‌الکتریک با تغییرات درصد بریکس تغییر قابل توجهی دارد به طوری که با افزایش بریکس، دامنه طیف کاهش می‌یابد. ضمن ارزیابی روش‌های مختلف رگرسیونی، روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی PLSR توانست درصد بریکس نمونه‌ها را با ضریب تبیین اعتبارسنجی ۰/۸۱ و خطای ۰/۷۲ درجه بریکس پیش‌بینی کند. نتایج حاصل همچنین نشان داد، این حسگر و روش اندازه‌گیری مورد مطالعه می‌تواند به عنوان روشی ساده و قابل اعتماد برای اندازه‌گیری درصد بریکس چغندر قند به کار گرفته شود.

واژه‌های کلیدی

بریکس، چغندر قند، رگرسیون چندمتغیره، طیف‌سنجی دی‌الکتریک

مقدمه

تولیدی در جهان از نیشکر و بقیه از چغندر قند به دست می‌آید (Anon, 2021). در ایران، ۶۰ درصد شکر تولیدی از چغندر قند و بقیه از نیشکر تولید می‌شود (Anon, 2022). حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد وزن

صنعت قند یکی از مهم‌ترین صنایع در زمینه تولید مواد غذایی است. به طور کلی در ۱۲۴ کشور دنیا شکر تولید می‌شود. نزدیک به ۸۰ درصد از شکر

فروسرخ نزدیک NIR^۲ اشاره کرد که تجهیزات مورد نیاز آن در محدوده طول موج کامل NIR قیمت نسبتاً بالایی دارد. با این حال تلاش‌هایی نیز برای سنجش مواد قندی در محصولات کشاورزی با طیف‌سنج‌های NIR موج‌کوتاه گزارش شده است (Bagherpour *et al.*, 2014; Moomkesh *et al.*, 2016; Bagherpour & Mohamadi Monovar, 2017; Aghaei Sadi *et al.*, 2018; Haghshenas *et al.*, 2019).

در مطالعه‌ای، امکان پیش‌بینی غلظت شکر در عصاره نیشکر با استفاده از یک سامانه بین‌الکترونیک بررسی شد. با استفاده از آرایه‌ای از حسگرهای گازی، بوی متصاعد شده از عصاره چهار رقم نیشکر مورد سنجش قرار گرفت و داده‌های حاصل از آن با استفاده از روش‌های رگرسیون چندمتغیره و شبکه عصبی برای پیش‌بینی میزان ساکاروز تحلیل شد که دقت مطلوبی نشان داد. با این حال، انتظار امکان اندازه‌گیری غلظت قند با چنین روشی بدون تخریب غده چغندر قند یا ساقه نیشکر نیازمند مطالعات علمی است (Zaki Dizaji *et al.*, 2020). یکی از روش‌های دیگری که پتانسیل سنجش میزان قند در مواد کشاورزی را در مطالعات علمی نشان داده، روش طیف‌سنجی دی‌الکتریک است. روش دی‌الکتریک به عنوان یک روش ساده و کم‌هزینه (در صورت طراحی مدارهای جایگزین دستگاه‌های استاندارد آزمایشگاهی) در ارزیابی خصوصیات مواد غذایی و کشاورزی به خصوص در دهه اخیر مورد توجه محققان واقع شده است (Jha *et al.*, 2011). از مزایای این روش نسبت به روش طیف‌سنجی NIR می‌توان به عمق نفوذ بیشتر میدان‌های الکتریکی در ماده اشاره کرد.

غده چغندر قند را آب تشکیل می‌دهد. باقیمانده وزن غده شامل مواد جامد قابل حل^۱ (SSC) و غیرقابل حل است که از این میزان حدود ۱۶ تا ۲۰ درصد را ساکاروز و تا حدود ۵ درصد را دیگر قندها (شامل گلوکز، فروکتوز و رافینوز) تشکیل می‌دهد (Mesbahi, 2015). بخشی از مواد جامد نیز شامل فیبرهای گیاهی است. اندازه‌گیری شاخص‌های سنجش عیار قند به منظور ارزش‌گذاری در هنگام خرید چغندر قند از کشاورزان و همچنین ارزیابی و کنترل فرایند و بازدهی استخراج قند از چغندر در کارخانه مورد نیاز است. درجه یا درصد بریکس یکی از معیارهای متداول سنجش عیار چغندر قند است. درصد بریکس نشان‌دهنده وزن مواد جامد قابل حل موجود در صد میلی‌لیتر محلول (شربت چغندر قند) است.

شاخص دقیق‌تر برای عیارسنجی تعیین درصد ساکاروز است که برای آن از روش پلاریمتری استفاده می‌شود. این روش نسبت به روش رفرکتومتری پرهزینه‌تر و پیچیده‌تر است. در روش رفرکتومتری، با اندازه‌گیری زاویه شکست نور در عبور از محلول شفاف شده می‌توان به غلظت مواد جامد حل شده دست یافت. برای اجرای این روش اندازه‌گیری، نیاز به استخراج عصاره از غده چغندر قند و آماده‌سازی نمونه است که این روش را کند می‌کند و تکرار آن زمان‌بر است. دستگاه‌های رفرکتومتر نیاز به کالیبراسیون‌های دوره‌ای برای کنترل دقت و صحت اندازه‌گیری دارند. از این‌رو توسعه روش‌ها و ابزارهای تشخیصی سریع برای این منظور که بتوانند به صورت غیرمخرب (یا با تخریب ناچیز) این اندازه‌گیری را پیش‌برد مورد توجه محققان است. از روش‌هایی که تا کنون مورد استفاده بوده‌اند می‌توان به روش طیف‌سنجی

غلات سنجش می‌شود (Deby, 1926). در ادامه، حسگرهای خازنی با منبع تغذیه متناوب برای تعیین مقدار رطوبت محصولات کشاورزی مورد استفاده فراوان قرار گرفت (Nelson, 2006). در مطالعه‌ای با استفاده از یک خازن صفحه موازی، میزان رطوبت خرما در محدوده بسامدی ۱ تا ۱۰۰ مگاهرتز اندازه‌گیری شد. نتایج مدل‌سازی با استفاده از تمامی محدوده بسامد اعمال شده نشان داد که درصد رطوبت با ضریب تبیین پیش‌بینی^۱ (R^2_P) برابر ۰/۹۶، ریشه میانگین مربعات خطای^۲ (RMSE) ۵/۲۸ درصد، و نسبت انحراف استاندارد^۳ (SDR) ۲/۹۷ قابل پیش‌بینی است (Bagheri *et al.*, 2014). در مطالعه‌ای دیگر، از روش طیف‌سنجی توان دی‌الکتریک با صفحات موازی در محدوده بسامدی ۱ تا ۱۰ مگاهرتز به منظور اندازه‌گیری غیرمخرب غلظت قند (بر حسب درجه بریکس و درجه پل (Pol) در ساقه نیشکر استفاده شد. مدل‌های رگرسیون خطی چندمتغیره^۴ MLR برای پیش‌بینی درجه بریکس و درصد Pol با $R^2 > 0/99$ و $RMSE < 0/31$ توسعه یافتند. میزان رطوبت نمونه‌های میان‌گره با $RMSE = 0/17$ پیش‌بینی شد (Naderi-Boldaji *et al.*, 2015).

در مطالعه‌ای دیگر، برای اندازه‌گیری غیرمخرب میزان قند مرکبات (پرتقال)، از روش تغییرات ضریب گذردهی دی‌الکتریک یا ظرفیت خازنی استفاده شد. نتایج به دست آمده همبستگی خطی را با ضریب ۰/۹۲ بین ضریب دی‌الکتریک و درصد بریکس پرتقال نشان داد. بنابراین، روش اندازه‌گیری غیرمخرب ظرفیت خازنی می‌تواند میزان قند موجود در پرتقال و میوه‌های دیگر را پیش‌بینی کند (Bhosale, 2017). در پژوهشی، برای تعیین

طیف‌سنجی دی‌الکتریک بیانگر روشی است که در آن مشخصه‌های دی‌الکتریک ماده (شامل ضریب دی‌الکتریک و فاکتور افت) یا پارامترهای الکتریکی تحت تأثیر این مشخصه‌ها تابعی از بسامد تحریک ماده (بسامد میدان الکتریکی) مورد سنجش قرار می‌گیرد که حاصل آن طیفی است که می‌توان به عنوان یک اثر انگشت از ماده مورد آزمون تحلیل و تفسیر شوند. پدیده‌های فیزیکی متعددی در اثر متقابل دی‌الکتریک با ماده رخ می‌دهد که شامل هدایت یونی در بسامدهای پایین تا چرخش دو قطبی‌ها و قطبیت الکترونی در بسامدهای بالاتر است (Nelson & Trabelsi, 2012). حسگرهای مورد استفاده در این روش حسگرهای خازنی هستند که در ناحیه بسامدی میکروویو تحریک و طیف‌های دی‌الکتریک حاصل از آن قیاس می‌شوند (Mireei *et al.*, 2016). اصولاً خروجی حسگرهای خازنی علاوه بر ارتباط با تغییر ماده دی‌الکتریک بین الکترودها، تحت تأثیر بسامد میدان الکتریکی، دما، ترکیب و ساختار ماده نیز هست (Hoog, 2014). از مزایای قابل توجه حسگرهای دی‌الکتریک می‌توان به صحت و دقت و قابلیت به کارگیری آنها برای اندازه‌گیری غیرمخرب ویژگی‌های مواد غذایی و کشاورزی اشاره کرد.

بررسی منابع نشان می‌دهد که روش دی‌الکتریک در کشاورزی همواره مورد توجه بوده، کاربردهای وسیعی پیدا کرده و در حال تبدیل شدن به ابزار اندازه‌گیری سودمندی است. اولین گزارش‌ها در زمینه اندازه‌گیری خواص مواد کشاورزی با استفاده از خصوصیات الکتریکی به حدود ۸۰ سال پیش برمی‌گردد که با اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی با استفاده از جریان مستقیم مقدار رطوبت دانه‌های

1- Prediction Coefficient of Determination

2- Root Mean Squared Error

3- Standard Deviation Ratio

4- Multiple Linear Regression

غیرمخرب غلظت قند بر حسب درجه بریکس در چغندر قند است.

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') یا ثابت دی‌الکتریک است که بیانگر قابلیت ذخیره انرژی با همسویی دوقطبی‌های موجود در ماده با میدان الکتریکی و جزء موهومی آن (ϵ'') بیانگر ضریب افت یا میزان انرژی تلف شده به شکل حرارت در ماده است. تغییر در خصوصیات و ترکیب ماده موجب تغییر در ضریب دی‌الکتریک و فاکتور افت ماده می‌شود.

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (1)$$

طیف‌سنجی دی‌الکتریک بیانگر روشی است که در آن ثابت دی‌الکتریک و فاکتور افت به عنوان مشخصه‌های دی‌الکتریک ماده تابعی از بسامد اندازه‌گیری شوند. طیف‌سنجی دی‌الکتریک نیازمند تجهیزات استاندارد آزمایشگاهی مانند تحلیل‌گر بردار^۲ یا تحلیل‌گر امپدانس^۳ برای اندازه‌گیری ضریب دی‌الکتریک و فاکتور افت به صورت دو مشخصه مستقل است. این تجهیزات گران قیمت اند و امکان دسترسی به آن به راحتی فراهم نیست. از این‌رو با استفاده از ترکیب مولد سیگنال و تحلیل‌گر طیف^۴ با استفاده از حسگرهای تشدیدکننده، امکان سنجش خواص دی‌الکتریک با اندازه‌گیری یک پارامتر تحت تأثیر ضریب دی‌الکتریک و فاکتور افت وجود دارد (Hoog et al., 2012).

رسیدگی میوه سیب در دوران انبارمانی بر اساس ویژگی‌های ظرفیت خازنی از یک سامانه آزمایشگاهی به منظور اندازه‌گیری ظرفیت حسگر خازنی استفاده شد. نتایج حاصل نشان داد که ثابت دی‌الکتریک طی رسیدن میوه کاهش می‌یابد، همچنین در مراحل رسیدن میوه، سفتی بافت سیب روند کاهشی و میزان مواد جامد قابل حل کل TSS^۱ روند افزایشی دارد (Hayati et al., 2018). در پژوهشی دیگر برای تعیین شاخص‌های کیفی میوه کیوی به صورت غیرمخرب از یک خازن صفحه موازی در محدوده بسامدی ۴۰ کیلوهرتز تا ۲۰ مگاهرتز استفاده و از شبکه عصبی مصنوعی برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی شاخص‌های کیفی میوه بهره برده شد. این مدل‌ها قادر به پیش‌بینی سفتی بافت با $R^2=0/92$ و $RMSE=4/9$ ، مواد جامد قابل حل کل با $R^2=0/91$ و $RMSE=0/21$ و pH با $R^2=0/86$ و $RMSE=1/34$ بودند (Fazayeli et al., 2019).

مطالعات نشان می‌دهد که روش دی‌الکتریک می‌تواند در اندازه‌گیری مقدار قند محصولات غذایی و کشاورزی به کار گرفته شود. تا کنون مطالعه‌ای در خصوص امکان اندازه‌گیری غلظت قند چغندر قند به صورت غیرمخرب با استفاده از روش دی‌الکتریک گزارش نشده است. به دلیل ابعاد نسبتاً بزرگ غده‌های چغندر قند، امکان قرار دادن کامل غده در حوزه میدان الکتریکی یک حسگر خازنی (مثل حسگر صفحه موازی) وجود ندارد و به کارگیری چنین روشی در صورتی سودمند خواهد بود که حسگر مجاورتی دی‌الکتریک توسعه داده شود تا با قرار گرفتن در کنار نمونه امکان اندازه‌گیری فراهم شود. هدف کلی از این پژوهش توسعه و ارزیابی یک حسگر دی‌الکتریک مجاورتی برای اندازه‌گیری

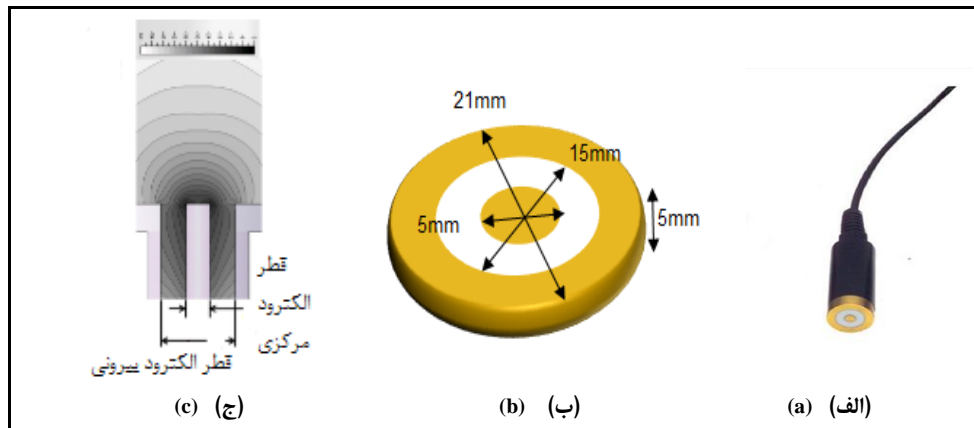
1- Total Soluble Solids
3- Impedance Analyzer

2- Vector Analyzer
4- Spectrum Analyzer

توسعه حسگر دی الکتریک مجاورتی

میلی متر و قطر داخلی و خارجی الکتروود بیرونی به ترتیب ۱۵ و ۲۱ میلی متر برش داده شد. عمق نفوذ میدان الکتریکی این حسگر که رابطه مستقیمی با قطر حسگر دارد حدود ۲۰ میلی متر است (Gregory *et al.*, 2017). بین این دو الکتروود یک قطعه جداکننده عایق از جنس تفلون قرار داده شد تا ارتباط رسانایی الکتریکی بین دو الکتروود برقرار نشود (شکل ۱).

در این پژوهش، یک حسگر دی الکتریک مجاورتی کواکسیال انتها- باز با هدف اندازه گیری توان خازنی تابعی از بسامد و ارتباط آن با درجه بریکس چغندر قند طراحی و ساخته شد. برای ساخت این حسگر از دو الکتروود فلزی دایره ای هم مرکز از جنس برنج با ضخامت ۵ میلی متر استفاده گردید که قطر الکتروود مرکزی آن ۵



شکل ۱- الف) حسگر دی الکتریک مجاورتی، ب) ابعاد الکتروودها و ج) حوزه انتشار میدان الکتریکی حسگر

Fig. 1- a) The proximal dielectric sensor, b) the dimensions of the electrodes, and c) the zone of influence of the sensor electrical field

متصل به الکتروودها در مجاورت ماده، به دلیل تفاوت در امپدانس خازنی، تقاطعی برای بازگشت بخشی از موج ارسالی ایجاد می کند که ضریب بازگشت تحت تأثیر تغییرات در ضریب دی الکتریک ماده در مجاورت حسگر تغییر می کند.

قبل از اجرای آزمایش های اصلی روی نمونه های چغندر قند و به منظور حصول اطمینان از عملکرد حسگر، از حسگر مجاورتی ساخته شده برای آزمون اثر غلظت قند در آب خالص استفاده شد. برای اجرای این آزمایش ها، پنج نمونه مختلف شامل آب خالص و محلول هایی با غلظت های ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ درصد وزنی قند (درجه بریکس) تهیه و آزمون شدند.

سامانه اندازه گیری دی الکتریک و روش اندازه گیری نمونه های چغندر قند

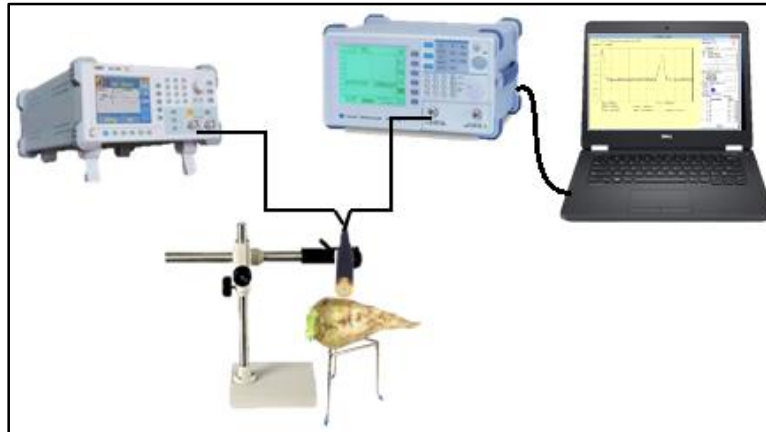
سامانه اندازه گیری شامل یک دستگاه مولد سیگنال (OWON, AG-4151, Hong Kong) است که با کابل های هم محور به دستگاه تحلیل گر طیف (GW-instek, GPS-827, Taiwan) متصل می شود. حسگر دی الکتریک با استفاده از یک رابط BNC بین این دو دستگاه قرار می گیرد به طوری که الکتروود مرکزی به قطب مثبت و الکتروود بیرونی به قطب منفی مدار متصل می شود. شکل ۲، طرحواره ای از سامانه اندازه گیری در این مطالعه را نشان می دهد. در این روش اندازه گیری، انتهای کابل هم محور

کاهش داده شد. به این شیوه، ۱۰۹ بسامد در کل دامنه سنجش شد که طیف حاصل از آن به شکل دامنه بر حسب بسامد دارای ۱۰۹ متغیر است. در هر نقطه مورد اندازه‌گیری روی غده، اندازه‌گیری دی‌الکتریک با سه تکرار در سه نقطه مجاور هم دنبال شد و طیف میانگین به عنوان طیف نماینده آن نقطه تحلیل گردید. همه مراحل آزمایش در دمای اتاق و در محل آزمایشگاه خواص فیزیکی- مکانیکی محصولات کشاورزی دانشگاه شهرکرد اجرا شد.

برای اندازه‌گیری درجه بریکس معیار نمونه‌ها، ابتدا از غده چغندر قند در نقطه اندازه‌گیری شده با حسگر دی‌الکتریک قطعه‌ای دربرگیرنده سه نقطه تکرار دی‌الکتریک با عمق حدود ۴-۳ سانتی‌متر بریده و غصاره آن با استفاده از دستگاه آسیاب استخراج شد. پس از صاف کردن نمونه با استفاده از کاغذ صافی، چند قطره از عصاره روی لنز شیشه‌ای دستگاه رفراکتومتر (مدل MA887 ساخت شرکت میلوآکی ایتالیا) با دقت ۰/۲ درجه بریکس ریخته و درجه بریکس آن قرائت شد. با استفاده از غصاره استخراج شده از نمونه، سه تکرار برای قرائت بریکس معیار در نظر گرفته شد. حسب تغییرات درجه بریکس در نقاط مختلف غده‌های با سایز بزرگ، در برخی نمونه‌ها در بیش از یک نقطه از غده اندازه‌گیری دی‌الکتریک شد و با استخراج عصاره از همان نقاط نیز بریکس معیار به طور جداگانه سنجش شد. با این رویکرد، در مجموع ۱۶۰ نقطه قرائت با روش‌های دی‌الکتریک و معیار سنجش شد.

با قرار دادن هد حسگر در محلول، طیف‌های دی‌الکتریک در بازه بسامدی صفر تا ۱۵۰ مگاهرتز ثبت شد.

۱۰۰ نمونه تصادفی چغندر قند از کارخانه قند چهارمحال واقع در شهر هفشجان تهیه شد. به منظور افزایش حداکثری دامنه تغییرات بریکس، نمونه‌ها از محموله‌های مناطق مختلف استان یا محموله‌های وارداتی از استان‌های دیگر تهیه شدند. نظر به زمان مورد نیاز برای تکمیل فرایند اندازه‌گیری و نگهداری نمونه‌ها در یخچال برای جلوگیری از تبخیر رطوبت، پلاستیکی بافت غده و تغییر غلظت قند، امکان سنجش تعداد نمونه بیشتر در فصل فعالیت کارخانه قند فراهم نشد. با توجه به شکل هندسی نامتقارن چغندر قند و سطح ناصاف آن، برای اندازه‌گیری با حسگر دی‌الکتریک، ابتدا یک برش بسیار نازک برای ایجاد سطحی صاف در نقطه اندازه‌گیری ایجاد و هد حسگر روی سطح قرار داده شد. با جاروب بسامد دستگاه مولد سیگنال در محدوده صفر تا ۱۵۰ مگاهرتز و تولید ولتاژهای سینوسی، توان خازنی برای هر بسامد با تحلیل‌گر طیف پس از تبدیل به حوزه بسامد اندازه‌گیری و ثبت شد. از آنجا که امکان جاروب بسامد به طور خودکار و ثبت هم‌زمان طیف روی تحلیل‌گر طیف وجود نداشت، تغییر بسامد در این محدوده به شکل دستی صورت گرفت. فواصل بسامدی جاروب شده ۴ مگاهرتز در نظر گرفته شد. با این حال، در نواحی وقوع تشدید (دره) در طیف حاصل و برای ردگیری دقیق‌تر تغییرات، فواصل بسامد به ۰/۵ مگاهرتز

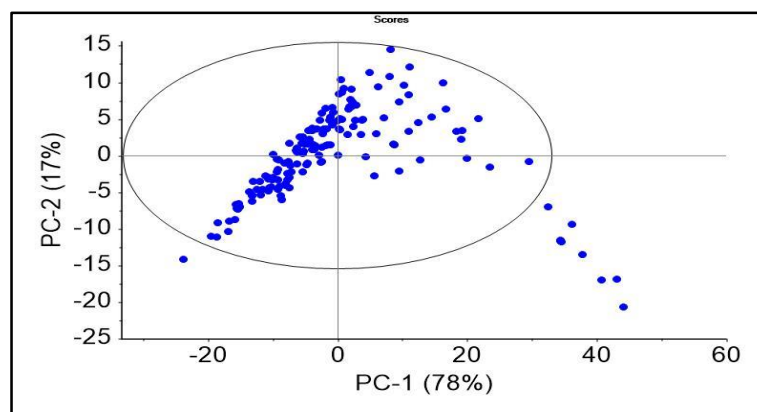


شکل ۲- سامانه اندازه گیری و نحوه اتصال حسگر به مولد سیگنال و تحلیل گر طیف

Fig. 2- The measurement system and connection of the sensor to the function generator and spectrum analyzer

پیش پردازش داده های طیفی به منظور کشف هرگونه طیف ناهمگون^۱ خواهد بود. با آزمون مؤلفه های اصلی PCA^۲ روی طیف ها و با استفاده از بیضی هتلینگ T^۲ (در سطح احتمال ۹۵ درصد)، احتمال وجود طیف ناهمگون بررسی و نمونه های کشف شده (در مجموع به تعداد ۸ نمونه) به عنوان داده پرت از مجموعه داده ها حذف شد (شکل ۳).

پیش پردازش داده ها و حذف طیف های ناهمگون طیف های حاصل از اندازه گیری با حسگر دی الکتریک، افزون بر دارا بودن اطلاعات مربوط به نمونه، بعضا ممکن است به دلیل برخی اختلال ها یا اغتشاش ها در سامانه اندازه گیری حاوی نویز یا تفاوت کاملا بارز از نظر شکل طیف شوند. از این رو برای تدوین مدل های رگرسیونی قابل اعتماد نیاز به



شکل ۳- تحلیل مؤلفه های اصلی روی طیف های دی الکتریک برای کشف طیف های ناهمگون

Fig. 3- PCA analysis on dielectric spectra for finding the outliers

عنوان متغیر وابسته تحلیل گردید. در طبقه بندی داده ها، ۷۰ درصد از داده ها برای آموزش و ۳۰ درصد از داده ها برای اعتبارسنجی استفاده شدند (Naderi-Boldaji *et al.*, 2015; Bahrami *et*

تجزیه و تحلیل داده ها

برای توسعه مدل های رگرسیونی، طیف های حاصل از نمونه های مختلف بر حسب دامنه تابعی از بسامد به عنوان متغیرهای پیشگو و درجه بریکس به

1- Outlier

2- Principal Component Analysis

P = تعداد پارامترها؛ N = تعداد داده‌ها؛ \hat{y}_i = مقادیر تخمینی؛ y_i = مقادیر مشاهده‌ای؛ \bar{y} = میانگین مقادیر مشاهده‌ای؛ و $\bar{\hat{y}}$ میانگین مقادیر تخمینی.

نتایج و بحث

شکل ۴، طیف‌های دی‌الکتریک بر حسب بسامد در بازه صفر تا ۱۵۰ مگاهرتز را برای نمونه‌های آب قند آزمون شده نشان می‌دهد. در طیف‌ها دو دره در محدوده‌های بسامدی ۵۰-۳۰ و ۱۴۰-۱۲۰ مگاهرتز اتفاق افتاده است که اصطلاحاً همان بسامدهای تشدید طیف هستند (Khalilian *et al.*, 2017). در این شکل و در تشدید اول برای نمونه‌ها، علاوه بر اینکه عمق دره‌ها تفاوت نسبتاً زیادی با افزایش غلظت قند نشان می‌دهد، بسامد دره‌ها نیز تغییر کرده است، به طوری که با افزایش درصد بریکس نمونه‌ها بسامد دره‌ها نیز بزرگ‌تر شده است. در دره دوم طیف، با افزایش درصد بریکس، بسامد دره افزایش یافته است. به طور کلی، این تغییرات افزایش بسامد دره‌های طیف نشان‌دهنده کاهش ضریب دی‌الکتریک نمونه با افزایش درصد بریکس است. با افزایش غلظت قند در محلول آب-قند، از تعداد مولکول‌های آزاد دوقطبی آب به دلیل ترکیب با قند کاسته می‌شود که این امر موجب کاهش ضریب دی‌الکتریک با افزایش غلظت قند محلول می‌شود.

شکل ۵، نمودار سه بعدی طیف‌های خام اولیه حاصل از نمونه‌های چغندر قند مورد آزمایش را در محدوده بسامدی صفر تا ۱۵۰ مگاهرتز نشان می‌دهد که بیانگر تغییرات قابل مشاهده‌ای در مشخصه‌های طیف است. برای مثال، شکل ۶ طیف‌های دی‌الکتریک حاصل از چند نمونه چغندر قند را با

(Alomar *et al.*, 2021; *al.*, 2020). برای توسعه مدل‌های رگرسیونی پیش‌بینی بریکس، از روش‌های رگرسیونی حداقل مربعات جزئی PLSR^۱ و رگرسیون بردار پشتیبان SVR^۲ شامل توابع خطی^۳، چندجمله‌ای^۴ و تابع شعاع محور^۵ استفاده شد. برای این تحلیل‌های آماری، از نرم‌افزار Unscrambler X10 استفاده شد. برای مقایسه مدل‌های مختلف از پارامترهای آماری شامل ضریب تبیین R^2 (رابطه ۲)، ریشه میانگین مربعات خطا RMSE (رابطه ۳) و انحراف پیشگویی باقیمانده RPD^۶ (رابطه ۴) استفاده شد. RPD که بهترین پارامتر در ارزیابی مدل‌های رگرسیونی محسوب می‌شود با تقسیم انحراف استاندارد مقادیر مرجع بر میانگین مربعات خطای پیش‌بینی مدل محاسبه می‌شود (Williams & Norris, 2001; Li *et al.*, 2007). در صورتی که مقدار این شاخص کمتر از یک باشد، توانایی پیش‌بینی مدل بسیار ضعیف است، مقادیر بین ۱/۵-۱ توانایی پیش‌بینی ضعیف، بین ۲-۱/۵ خوب و از ۲ تا ۲/۵ قدرت پیش‌بینی بسیار خوب را نشان می‌دهد. با RPD بزرگ‌تر از ۲/۵ می‌توان توانایی پیش‌بینی مدل را عالی تلقی کرد.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right]^2 \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N-P} \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - Y_i)^2} \quad (3)$$

$$RPD = \frac{SD}{RMSE} \quad (4)$$

که در آنها،

1- Partial Least Squares Regression

2- Support Vector Regression

3- Linear

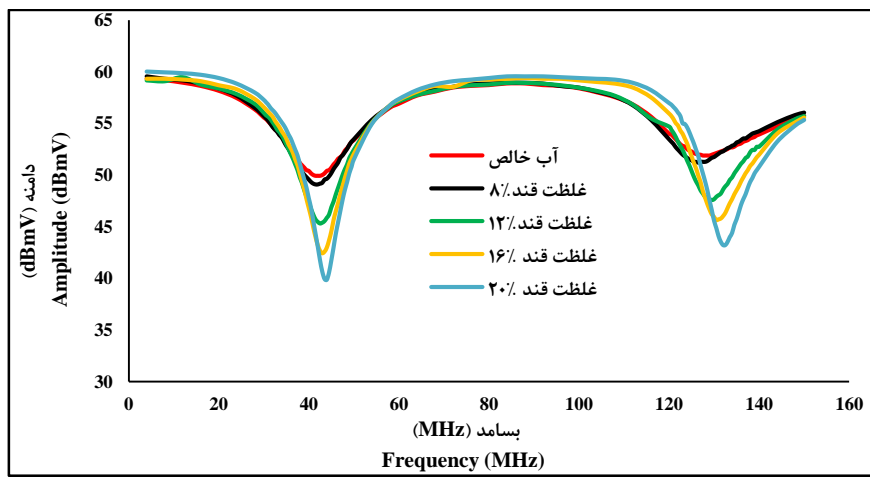
4- Poly Kernel

5- Radial Basis Function

6- Residual Predictive Deviation

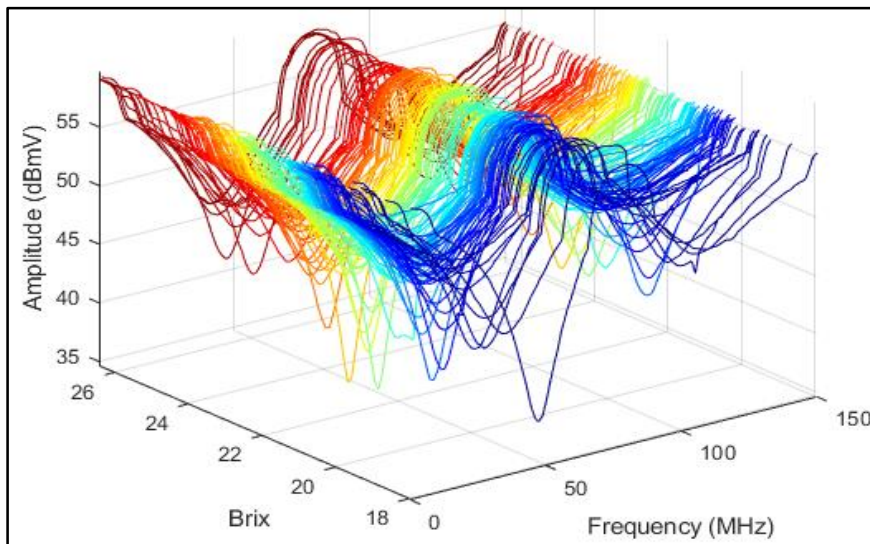
در جهت افزایش بسامد دره‌ها) منتقل می‌شوند که نتیجه کاهش ضریب دی‌الکتریک آب چغندر است زیرا مواد فیبری خشک (تفاله) چغندر قند و سایر مواد بیولوژیک دارای ضریب دی‌الکتریک بسیار ناچیز (بین ۳ و ۵) هستند و اصولاً محلول موجود در بافت ماده عامل اثرگذار دی‌الکتریک است.

درصدهای بریکس متفاوت (در محدوده کمینه تا بیشینه تغییرات) نشان می‌دهد. با مقایسه این طیف‌ها با طیف‌های حاصل از نمونه‌های آب قند (شکل ۴) مشخص می‌شود که روند تغییرات در بسامد دره‌ها در هر دو شکل مشابه است. به طور کلی با افزایش درصد بریکس، دره‌ها به سمت راست



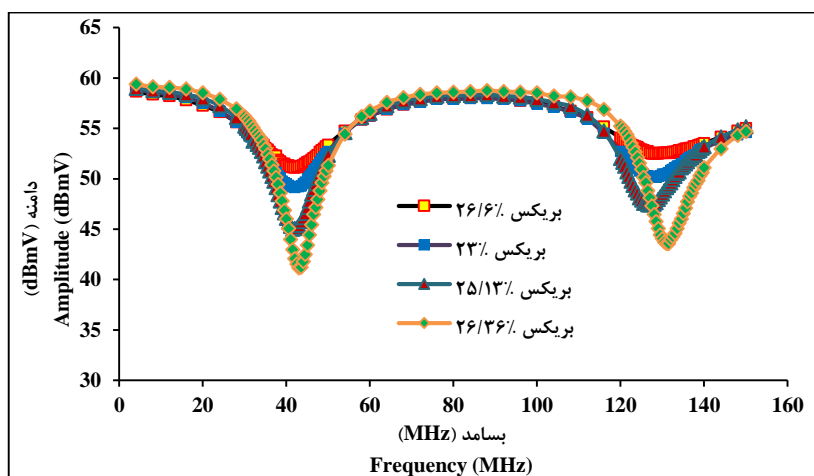
شکل ۴- طیف‌های دی‌الکتریک حاصل از آزمون محلول‌های آب-قند با غلظت متفاوت

Fig. 4- The dielectric spectra of sugar-water solutions with different concentrations



شکل ۵- طیف‌های حاصل از نمونه‌های چغندر قند

Fig. 5- The dielectric spectra of the sugar beet samples



شکل ۶- طیف‌های حاصل از چند نمونه چغندر قند با بریکس‌های متفاوت

Fig. 6- The dielectric spectra of some sugar beet samples with different Brix

درجه است و انحراف معیار داده‌ها در دو دسته مقدراری نزدیک به هم دارد که مؤید دسته‌بندی تصادفی داده‌ها به دو دسته آموزش و اعتبارسنجی است.

جدول ۱، آمار توصیفی دسته داده‌های آموزش و اعتبارسنجی را ارائه می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، میانگین بریکس برای هر دو دسته، با اختلاف ناچیز، حدود ۲۲/۵

جدول ۱- آمار توصیفی بریکس برای دسته داده‌های آموزش و اعتبارسنجی

Table 1. Descriptive statistics of Brix for training and validation data sets

دسته اعتبارسنجی	دسته آموزش	متغیر	
Validation set	Training set	Variable	
46	106	Sample number	تعداد نمونه
17.51-26.14	17.93-26.43	Range	دامنه تغییرات
22.41	22.53	Mean	میانگین
1.91	1.98	Standard deviation	انحراف معیار

را دارا بودند به گونه‌ای که توانستند با دقت عالی مقدار بریکس را پیش‌بینی کنند. این در حالی است که تشخیص و پیش‌بینی مقدار بریکس با مدل‌های SVR (Gaussian)، SVR (Rbf)، SVR (Polynomial-2) و SVR (Polynomial-3) با RPD بین ۲-۲/۵ با دقت بسیار خوب امکان‌پذیر بود ولی در مدل SVR (Linear) با RPD برابر ۱/۴۷ نتایج مناسبی به دست نیامد.

جدول ۲، نتایج اعتبارسنجی درونی کامل^۱ مدل‌های آموزش یافته برای پیش‌بینی بریکس را نشان می‌دهد. با توجه به مقدار شاخص‌های R^2 ، RMSE و RPD مدل‌های تدوین شده، نتایج پیش‌گویی مقدار بریکس نمونه‌های چغندر قند با مدل‌های PLSR و SVR (Polynomial-4) با RPD به ترتیب برابر ۲/۵۲ و ۳/۰۱ بهترین قدرت پیش‌بینی در آموزش

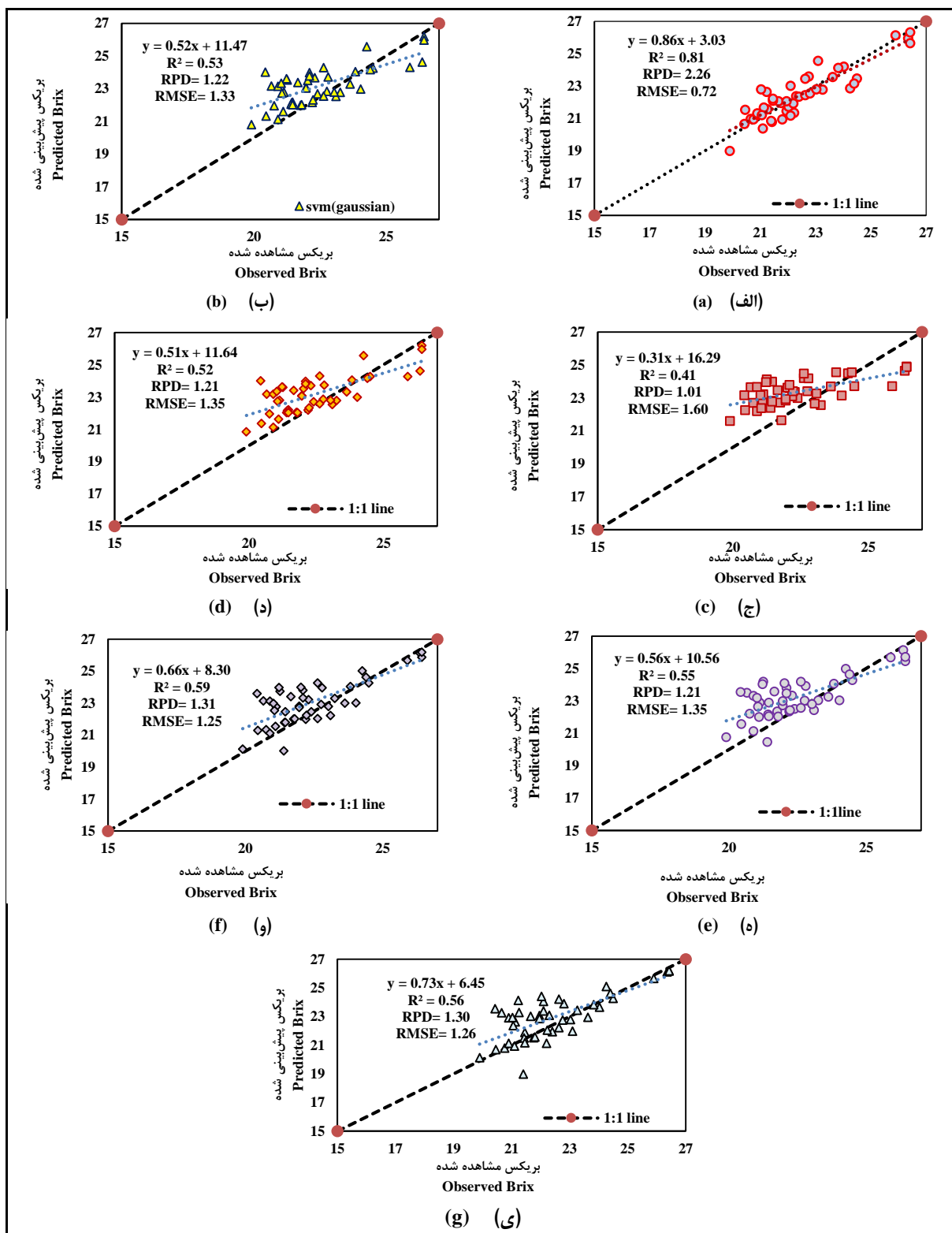
جدول ۲- مقادیر شاخص‌های آماری اعتبارسنجی درونی مدل‌های رگرسیونی آموزش یافته برای پیش‌بینی بریکس

Table 2. The statistical characteristics of training regression models for Brix

RPD	RMSE (Brix)	R ²	روش‌های رگرسیونی Regression methods
2.52	0.78	0.85	PLSR
2.18	0.91	0.82	SVR (Gaussian)
1.47	1.35	0.55	SVR (Linear)
2.15	0.92	0.82	SVR (rbf)
2.21	0.89	0.81	SVR (polynomial-2)
2.48	0.80	0.85	SVR (polynomial-3)
3.01	0.66	0.89	SVR (polynomial-4)

نتایج اعتبارسنجی بیرونی (با دسته داده مشاهده نشده اعتبارسنجی) مدل‌های پیش‌بینی عیار چغندر قند (نمودار مقادیر بریکس پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی بریکس) با مدل‌های رگرسیونی مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. در شکل ۷- الف مشاهده می‌شود تجمع داده‌ها در اطراف خط $y=x$ و نزدیک بودن شیب خط رگرسیونی PLSR با خط $y=x$ حاکی از این است که این مدل رگرسیونی (با ۴ متغیر پنهان) توانسته است با دقت بیشتری نسبت به روش‌های دیگر مقدار بریکس نمونه‌های چغندر قند را پیش‌بینی کند. RPD حاصل از برآورد این مدل برابر ۲/۲۶ است که بیانگر یک مدل بسیار خوب است و RMSE نشان‌دهنده وجود خطای کمتر از یک درجه بریکس در پیش‌بینی این مدل است. دلیل کاهش RPD در اعتبارسنجی مدل‌های دیگر نسبت به آموزش مدل‌ها می‌تواند با نامناسب بودن برازش یا بیش‌برازش مدل‌ها در آموزش مرتبط باشد. از این رو نمی‌توان مدل‌های دیگر را قابل اطمینان در نظر گرفت. با توجه به نتایج حاصل از این مطالعه، روش رگرسیونی PLSR توانست با $R^2=0/81$ و

نتایج اعتبارسنجی بیرونی (با دسته داده مشاهده نشده اعتبارسنجی) مدل‌های پیش‌بینی عیار چغندر قند (نمودار مقادیر بریکس پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی بریکس) با مدل‌های رگرسیونی مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. در شکل ۷- الف مشاهده می‌شود تجمع داده‌ها در اطراف خط $y=x$ و نزدیک بودن شیب خط رگرسیونی PLSR با خط $y=x$ حاکی از این است که این مدل رگرسیونی (با ۴ متغیر پنهان) توانسته است با دقت بیشتری نسبت به روش‌های دیگر مقدار بریکس نمونه‌های چغندر قند را پیش‌بینی کند. RPD حاصل از برآورد این مدل برابر ۲/۲۶ است که بیانگر یک مدل بسیار خوب است و RMSE نشان‌دهنده وجود خطای کمتر از یک درجه بریکس در پیش‌بینی این مدل است. دلیل کاهش RPD در اعتبارسنجی مدل‌های دیگر نسبت به آموزش مدل‌ها می‌تواند با نامناسب بودن برازش یا بیش‌برازش مدل‌ها در آموزش مرتبط باشد. از این رو نمی‌توان مدل‌های دیگر را قابل اطمینان در نظر گرفت. با توجه به نتایج حاصل از این مطالعه، روش رگرسیونی PLSR توانست با $R^2=0/81$ و



شکل ۷- نتایج اعتبار سنجی بریکس پیش‌بینی شده با روش‌های رگرسیونی الف) PLSR، ب) SVR (Gaussian)، پ) SVR (Linear)، ت)

ث) SVR (RBF)، ج) SVR (Polynomial-2)، چ) SVR (Polynomial-3)، ح) SVR (Polynomial-4)

Fig. 7. Validation results of predicted versus observed Brix with the regression models of a) PLSR, b) SVR (Gaussian), c) SVR (linear), d) SVR (RBF), e) SVR (Polynomial-2), f) SVR (Polynomial-3), and g) SVR (Polynomial-4)

تفاوت‌های مرتبط با تغییر بریکس را نشان داد. با آزمون انواعی از روش‌های رگرسیونی، روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR) توانست درصد بریکس نمونه‌های چغندر قند را با ضریب تبیین اعتبارسنجی ۰/۸۱ و خطای ۰/۷۲ درجه بریکس پیش‌بینی کند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که حسگر و روش اندازه‌گیری ارزیابی شده در این مطالعه می‌تواند به عنوان روشی ساده و قابل اعتماد برای اندازه‌گیری درصد بریکس چغندر قند به شکل سریع و غیرمخرب به کار گرفته شود. در صورت طراحی مدارهای الکتریکی برای تغذیه و ثبت طیف خروجی برای حذف تجهیزات آزمایشگاهی (شامل مولد سیگنال و تحلیل‌گر طیف) می‌توان به سامانه‌ای با هزینه کمتر نسبت به روش‌های رقیب مانند طیف‌سنجی NIR دست یافت. به منظور بهبود دقت این حسگر و روش اندازه‌گیری، بهینه‌سازی پراب حسگر از نظر ابعاد و فاصله بین الکترودها برای افزایش حوزه نفوذ میدان الکتریکی با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی الکترومغناطیس توصیه می‌شود. تأثیر عواملی مانند نیروی تماس بین هد حسگر و بافت چغندر و تغییر خصوصیات مکانیکی (مانند سفتی) بافت در نمونه‌های مختلف می‌تواند برای افزایش دقت روش اندازه‌گیری مورد مطالعه قرار گیرد.

همان‌طور که اشاره شد، طیف‌های دی‌الکتریک حاصل از نمونه‌های چغندر قند بسته به تغییرات مشخصه‌های دی‌الکتریک، هم در جهت بسامد و هم در جهت دامنه دارای تغییر هستند. از این‌رو با به کارگیری روش‌های مدل‌سازی غیرخطی مانند شبکه عصبی مصنوعی با لحاظ کردن تغییرات طیف در هر دو جهت بسامد و دامنه احتمالاً بتوان به مدل‌های دقیق‌تر برای پیش‌بینی بریکس دست یافت که نیازمند بررسی خواهد بود.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، روش دی‌الکتریک با توسعه یک حسگر مجاورتی به عنوان یک روش ساده و غیرمخرب برای اندازه‌گیری غلظت قند چغندر قند توسعه داده شد و ارزیابی گردید. قبل از اندازه‌گیری، تنها پوست نازکی از سطح چغندر قند برای ایجاد یک سطح صاف برای تماس هد حسگر برداشته شد که در مقایسه با تخریب بافت برای استخراج عصاره برای اندازه‌گیری با روش رفرکتومتری تخریب قابل توجهی نیست. با نفوذ یافتن میدان الکتریکی این حسگر در چغندر، و با تغییر ضرایب دی‌الکتریک ماده بسته به غلظت قند، پاسخ‌های طیفی دی‌الکتریک در بازه بسامدی صفر تا ۱۵۰ مگاهرتز

مراجع

- Aghaei sadi, M., Minaei, S., Jamshidi, B., & Abdollahian Noghbi, M. (2018). Non-destructive evaluation of sugar content using a combination of near-infrared spectroscopy (NIRS) and chemometrics methods. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 49(1), 9-18. (in Persian)
- Alomar, S., Mireei, S. A., Hemmat, A., Masoumi, A. A., & Khademi, H. (2021). Comparison of Vis/SWNIR and NIR spectrometers combined with different multivariate techniques for estimating soil fertility parameters of calcareous topsoil in arid climate. *Biosystems Engineering*, 201, 50-66
- Anon. (2021). *Statistical yearbook 2021*. Food and Agricultural Organization of United Nations. Rome.
- Anon. (2022). Iranian Sugar Factories Syndicate (INFS). <http://ISFS.ir>.

- Bagheri, R., Mireei, S. A., Sadeghi, M., Masoumi, A., & Moomkesh, Sh. (2014). Non-destructive dielectric method to measure moisture of date. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 45(2): 97-104. (in Persian)
- Bagherpour, H., & Mohammadi Monovar, H. (2017). Non-destructive determination of moisture content and brix value in carrot using near infrared spectroscopy (NIRS). *Biosystems Engineering*, 48(1), 1-7. (in Persian)
- Bagherpour, H., Minaei, S., Abdollahian Noghabi, M., & Khorasani Fardvani, M. E. (2014). Non-destructive determination of sugar content in root beet by near infrared spectroscopy (NIRS). *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 12(46), 219-228. (in Persian)
- Bahrami, M. E., Honarvar, M., Ansari, K., & Jamshidi, B. (2020). Measurement of quality parameters of sugarbeet juices using near-infrared spectroscopy and chemometrics. *Journal of Food Engineering*, 271, 109775
- Bhosale, A. A. 2017. Detection of sugar content in citrus fruits by capacitance method. *Procedia Engineering*, 181, 466-471
- Deby, P. (1929). *Polar molecules*. Dover Pub. Inc. New York 60.
- Fazayeli, A., Kamgar, S., Nassiri, S. M., Fazayeli, H., & Guardia M. D. L. (2019). Dielectric spectroscopy as a potential technique for prediction of kiwifruit quality indices during storage. *Information Processing in Agriculture*, 6(4), 479-486.
- Gregory, A. P., Seppala, J., & Lahtinen, T. (2017). Open-ended coaxial dielectric probe effective penetration depth determination. *IEEE Transactions of Microwave Theory and Technology*, 64(3), 915-923.
- Haghshenas, A., Mireei, S. A., Sadeghi, M., & Nazeri, M. (2019). Nondestructive firmness estimation of tomato fruit using near infrared spectroscopy. *Journal of Crop Production and Processing*, 9(3), 113-123. (in Persian)
- Hayati, A., Raofat, M. H., Kamgar, S., & Jahani, F. (2018). Feasibility of using electrical capacitance for determining the fruit ripeness of apple. *Biosystems Engineering*, 46(2): 195-203. (in Persian)
- Hoog, N. A. (2014). Stub resonators transmission line based water sensors (*Ph. D. Thesis*), University of Twente. The Netherlands
- 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.
- Jha, S. N., Narsaiah, K., & Basediya, A. L. (2011). Measurement techniques and application of electrical properties for nondestructive quality evaluation of foods- a review. *Journal of Food Science and Technology*, 48(4), 387-411.
- Khalilian, H., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Naderi-Boldaji, M., & Rostami, S. (2017). Developing and testing of a cylindrical dielectric sensor for measuring sugar concentration of sugar beet syrup. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 48(1), 137-144. (in Persian)
- Li, X., He, Y., Wu, C., & Sun, D. (2007). Nondestructive measurement and fingerprint analysis of soluble solid content of tea soft drink based on vis/nir spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, 82, 316-323.
- Mesbahi, G. (2015). *Fundamentals of sugar processing technology*. Nashr Iran Press, Iran. (in Persian)
- Mireei, A., Bagheri, R., Sadeghi, M., & Shahraki, A. (2016). Developing an electronic portable device based on dielectric power spectroscopy for nondestructive prediction of date moisture content. *Sensors and Actuators A. Physical*, 247, 289- 297. (in Persian)

- Moomkesh, Sh., Mireei, S. A., Sadeghi, M., & Nazeri, M. (2016). Non-destructive prediction of quality parameters of sweet lemon (*Citrus limetta*) by VIS/SWNIR spectroscopy. *Biosystems Engineering*, 47(4), 603-613. (in Persian)
- Naderi-Boldaji, M., Fazeliyan-Dehkordi, M., Mireei, S. A., & Ghasemi-Varnamkhasti, M. (2015). Dielectric power spectroscopy as a potential technique for the non-destructive measurement of sugar concentration in sugarcane. *Biosystems Engineering*, 140, 1-10.
- Nelson, S. O. (2006). Agricultural applications of dielectric measurements. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 13, 688-702.
- Nelson, S. O., & Trabelsi, S. (2012). Factors influencing the dielectric properties of agricultural and food products. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 46(2), 93-107.
- Williams, P. C., & Norris, K. (2001). *Near-infrared technology in the agricultural and food industry*. St. Paul, MN: American Association of Cereal Chemists, Inc.
- Zaki Dizaji, H., Adibzadeh, A., & Aghili Nategh, N. (2020). Application of E-nose technique to predict sugarcane syrup quality based on purity and refined sugar percentage. *Journal of Food Science and Technology*, 58, 4149-4156.

Research Paper

Development and Evaluation of a Proximal Dielectric Sensor for Nondestructive Measurement of Sugar Concentration in Sugar Beet

**A. Asadi, M. Naderi-Boldaji*, A. Lotfalian, M. Ghasemi-Varnamkhasti
and S. Abdanan Mehdizadeh**

*Corresponding Author: Associate professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. Email: naderi.mojtaba@sku.ac.ir

Received: 13 December 2022, Accepted: 12 March 2023

[http://doi: 10.22092/AMSR.2023.360854.1434](http://doi:10.22092/AMSR.2023.360854.1434)

Abstract

Determination of sugar concentration of sugar beet in sugar factories is of great importance and is a basis for valuation of the sugar beet as well as assessment of the sugar production process in the factory. In this study with the aim of development of a non-destructive method for measurement of the sugar concentration of sugar beet in terms of Brix, a proximal dielectric sensor was developed and evaluated. This sensor is an open-end coaxial probe consisting of two metallic concentric ring electrodes which is connected to function generator and spectrum analyzer through coaxial cables. One hundred random samples of sugar beet were selected and measured by the dielectric sensor. Dielectric spectra i.e. amplitude as a function of frequency were obtained in the frequency range of 0-150 MHz. The reference Brix was measured with extracting juice from the points of dielectric measurement using a refractometer. The results showed that in the ranges of 30-50 and 120-140 MHz, the dielectric spectra varied noticeably in relation with variations in sugar beet Brix so that the amplitude decreased with increasing the Brix. The partial least square regression (PLSR) method could model the Brix as a function of the dielectric spectra variables with $R^2=0.81$ and RMSE of 0.72 Brix. The results of the study indicated that the dielectric sensor and measurement method was a simple and reliable method for non-destructive measuring of sugar beet Brix.

Keywords: Brix, Dielectric Spectroscopy, Multivariate Regression, Sugar Beet



© 2022 Agricultural Mechanization and Systems Research, Karaj, Iran. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)