

مقاله علمی - پژوهشی

بررسی امکان سنجش غلظت ساکاروز در نیشکر شرید شده با استفاده از

روش طیف‌سنجی دی‌الکتريک

علی فرحمندي^۱، مجتبی نادری بلداجی^{۲*}، مارال عجمیان^۳، مهدی قاسمی ورنامخواستی^۴

و سامان آبدانان مهدی‌زاده^۵

۱، ۲ و ۴- به ترتیب: دانشجوی دکتری؛ و دانشیاران گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، ایران
۳- دکتری، موسسه تحقیقات و آموزش توسعه نیشکر و صنایع جانبی خوزستان، اهواز، ایران
۵- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملائانی، اهواز، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱/۲۷

چکیده

نیشکر محصولی است کلیدی در تولید شکر کشور که قطب تولید آن در استان خوزستان است. پس از برداشت از مزرعه و ورود آن به کارخانه، نیشکر با استفاده از دستگاه شریدر خرد و ایافی می‌شود. در این مطالعه، برای سنجش ساکاروز موجود در نیشکر شرید شده، روش طیف‌سنجی دی‌الکتريک در بازه بسامد صفر تا صد مگاهرتز با استفاده از حسگر دی‌الکتريک استوانه‌ای با قابلیت تراکم نمونه ارزیابی شد. تعداد ۵۵ نمونه نیشکر شرید شده در فصل برداشت نیشکر در سال ۱۴۰۰ از فرایند تولید کارخانه شکر خام سلمان فارسی خوزستان تهیه شد و ضمن اندازه‌گیری شاخص‌های بریکس با روش رفرکتومتري، Pol با روش پلاریمتری ساده و درصد ساکاروز با روش پلاریمتری مضاعف، نمونه‌ها با حسگر دی‌الکتريک مورد سنجش قرار گرفت و طیف‌های حاصل از آن برای سنجش میزان شاخص‌های غلظت قند (به عنوان متغیرهای وابسته) تحلیل شد. از روش‌های رگرسیونی چند متغیره حداقل مربعات جزیی (PLSR)، رگرسیون مولفه‌های اصلی (PCR) و رگرسیون ماشین بردار پشتیبان (SVR) برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی متغیرهای غلظت استفاده شد. اعتبارسنجی مدل پیش‌بینی PLSR پیش‌بینی قوی‌تری از درصد ساکاروز حاصل از روش پلاریمتری مضاعف ($R^2 = 0.79$ ، $RMSE = 0.75$ و $RPD = 2.22$) در مقایسه با Pol ($R^2 = 0.76$ ، $RMSE = 0.8$ و $RPD = 2.07$) و بریکس ($R^2 = 0.77$ ، $RMSE = 0.89$ و $RPD = 2$) نشان داد. این نتیجه با سهم بیشتر قند ساکاروز در مواد انحلال‌پذیر در عصاره نیشکر و تعداد گروه‌های بیشتر OH مولکول ساکاروز در مقایسه با دیگر قندهای موجود در عصاره و تأثیر غالب ساکاروز بر خصوصیات دی‌الکتريک عصاره نیشکر قابل توجیه است. با بهینه‌سازی و بهبود دقت سنجش این روش می‌توان ابزاری ساده و کم هزینه برای استفاده در صنایع شکر ارائه داد.

واژه‌های کلیدی

پلاریمتری مضاعف، حسگر دی‌الکتريک، غلظت قند، نیشکر

مقدمه

تولیدی از آن نقش بسیار مهمی در تأمین انرژی مورد نیاز زندگی روزمره انسان دارد. در سراسر جهان، نیشکر یکی از محصولات مهم تجاری است که برای تولید انواع مختلفی از

نیشکر از گیاهان مهم قندی است که کشت و کار آن در دنیا سابقه‌ای طولانی دارد. نیشکر در مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری می‌روید و شکر

دستگاهی کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC)^۲ و کروماتوگرافی گازی-جرمی (GC-MASS)^۳ اشاره کرد. این روش‌ها به دلیل هزینه اولیه زیاد در آزمایشگاه‌های کنترل کیفی مستقر در کارخانه‌های قند قابل دسترس نیستند، از این‌رو از برخی روش‌های سریع‌تر مانند پلاریمتری استفاده می‌شود. با این‌حال، همین روش‌ها نیز نسبتاً زمان‌بر و هزینه‌بر هستند و برای اجرا نیاز به آماده‌سازی نمونه دارند. برای مثال در روش پلاریمتری نیاز است با اضافه کردن استات سرب قلیایی به نمونه عصاره، کدورت آن را برطرف کرد تا بتوان نمونه‌ای شفاف و زلال برای اندازه‌گیری به دست آورد. از این منظر، محققان در تلاش برای یافتن روش‌های سریع‌تر، ساده‌تر و در عین حال کم هزینه‌تر، فناوری‌های دیگری را نیز بررسی کرده‌اند. یکی از روش‌های مورد استفاده و مورد توجه برای این سنجش، طیف‌سنجی NIR است که با آن می‌توان اطلاعات مفیدی در مورد ترکیب شیمیایی ماده ارائه داد. فوفافود و همکاران (Phuphaphud *et al.*, 2020) با استفاده از این روش به شکل غیرمخرب و برای نظارت بر تغییر در کیفیت نیشکر در برنامه‌های کاشت به بررسی میزان ساکاروز در ساقه نیشکر پرداختند. در مطالعه‌ای دیگر، پیش‌بینی‌های بسیار خوبی برای رطوبت، Brix و مقدار ساکاروز چغندر قند با استفاده از طیف‌سنجی NIR به دست آمد (Pan *et al.*, 2015). مطالعه دیگری امکان تعیین مستقیم مقدار Pol ساقه نیشکر را با استفاده از ابزار قابل حمل NIR نشان داد (Taira *et al.*, 2013). اگرچه روش‌های طیف‌سنجی NIR دقت مطلوبی در اندازه‌گیری ویژگی‌های مواد کشاورزی مانند میزان قند ارائه می‌دهند، اما روشی

شیرین‌کننده‌ها مانند شکر سفید و قهوه‌ای استفاده می‌شود (Yousefi *et al.*, 2016). برزیل با تولید سالانه ۷۵۷ میلیون تن نیشکر، ۴۰ درصد از کل تولید نیشکر جهان را دارد. هندوستان و چین به ترتیب با تولید سالانه ۳۷۰ و ۱۰۸ میلیون تن نیشکر در رده‌های بعدی قرار دارند (Ungureanu *et al.*, 2022). در ایران، خوزستان با سطح زیر کشت حدود ۹۰ هزار هکتار با عملکرد متوسط ۹۰ تن نی در هکتار و تولید سالانه تقریباً ۸۰۰ هزار تن شکر از مستعدترین مناطق نیشکرخیز جهان است (Shushtri *et al.*, 2008). ساقه نی (بدون خاشاک) حاوی ۷۶-۷۳ درصد آب، ۲۴-۲۷ درصد مواد جامد شامل ۱۶-۱۰ درصد مواد جامد انحلال‌پذیر و ۱۶-۱۱ درصد فیبر است. اجزای تشکیل‌دهنده عصاره ساقه نی عبارت‌اند از انواع قندها (۹۲-۷۵ درصد از مواد جامد انحلال‌پذیر) که شامل ۸۸-۷۰ درصد ساکاروز، ۲-۴ درصد گلوکز و ۴-۲ درصد فروکتوز است (Meade & Chen, 1977). در بسیاری از کشت و صنعت‌های تولید نیشکر، تأخیر زمانی بین برداشت و آسیاب کردن نیشکر بین ۳ تا ۱۰ روز است که باعث ایجاد خسارت‌های قابل توجهی در قند قابل استحصال می‌شود (Uppal, 2023). کیفیت نیشکر بر اساس مقدار ساکاروز آن تعیین می‌شود. وجود قندهای گلوکز و فروکتوز (به شکل قند اینورت) در کنار ساکاروز موجب خطا در سنجش ساکاروز با روش پلاریمتری می‌شود که به آن Pol^۱ کاذب گفته می‌شود. از این‌رو سنجش دقیق‌تر ساکاروز مستلزم به کارگیری روش‌های پیچیده‌تری است.

از روش‌های بسیار دقیق برای اندازه‌گیری غلظت انواع قندها در نیشکر می‌توان به روش‌های تجزیه

1- Polarization

2- High Performance Liquid Chromatography

3- Gas-Mass Chromatography

4- Electrical Capacitance Tomography

نسبتاً گران قیمت است و آماده کردن نمونه برای آن باید بسیار دقیق و یکنواخت باشد. سنجش دقیق ساکاروز با استفاده از طیفسنجی NIR و با توجه به طول موج‌های پایه جذب ساکاروز نیازمند به-کارگیری طیفسنج‌های با محدوده کامل NIR (تا ۲۵۰۰ نانومتر) است که پرهزینه هستند و دسترسی به آنها نیز به واسطه محدودیت‌های فناوری در کشور مشکل است.

روش‌های مبتنی بر خواص دی‌الکتریک در حال حاضر در تعیین کیفیت انواع محصولات کشاورزی به عنوان روشی ساده، ارزان، غیرمخرب، سریع و قابل اعتماد مورد توجه قرار گرفته‌اند (Arumugam *et al.*, 2019). ارزیابی ویژگی‌های

دی‌الکتریک مواد کشاورزی و غذایی پتانسیل بسیار خوبی برای سنجش خصوصیات و کیفیت این مواد نشان داده است. عوامل تأثیرگذار بر ویژگی‌های دی‌الکتریک مواد شامل رطوبت، دما، بسامد میدان الکتریکی، میزان جامد انحلال‌پذیر، چگالی ماده و ترکیبات شیمیایی (میزان کربوهیدرات، چربی، فیبر و غیره) است. رطوبت اثرگذارترین عامل در تغییر ویژگی‌های دی‌الکتریک ماده است. ویژگی‌های دی‌الکتریک مواد تحت تأثیر واکنش ماده در برهمکنش با یک میدان الکتریکی خارجی اندازه‌گیری می‌شوند. طیفسنجی دی‌الکتریک به طور گسترده در تحلیل و نظارت بر کیفیت مواد بیولوژیکی مطالعه و به کار گرفته شده است (Hoog-Antonyuk *et al.*, 2014; Al Faruq *et al.*, 2019; Teseme & Weldeselassie, 2020; Valantina, 2021). روش دی‌الکتریک در مطالعات متنوعی در مورد کیفیت مواد غذایی و محصولات کشاورزی از جمله رسیدگی گلابی (Guo *et al.*, 2015)، کیوی (Fazayeli *et al.*, 2019) و هلو

آزمایش نمونه‌های محلول آب قند با قندهای ساکاروز، گلوکز، فروکتوز و مالتوز با یک حسگر دی‌الکتریک نشان دادند که قابلیت تفکیک نسبتاً خوبی بین انواع قند، به خصوص ساکاروز از فروکتوز و گلوکز وجود دارد.

ویژگی‌های دی‌الکتریک زمینه‌ای برای توسعه روشی جدید به منظور امکان‌سنجی اندازه‌گیری غلظت قند در نیشکر ایجاد می‌کند. آرومگام و همکاران (Arumugam *et al.*, 2019) در پژوهشی با استفاده از روش دی‌الکتریک به صورت غیرمخرب برای کیفیت نیشکر پس از برداشت بررسی‌هایی کردند. در این بررسی‌ها، ضریب گذردهی نسبی ساقه نیشکر برای پیش‌بینی درجه Brix آن اندازه‌گیری و از یک موج سینوسی ۵ ولت در ۵ بسامد مختلف در محدوده ۱ کیلوهرتز تا ۱ مگاهرتز با به کارگیری خازن صفحه موازی با نمونه‌های ساقه نیشکر به عنوان ماده دی‌الکتریک استفاده شد (Arumugam *et al.*, 2019). نادری بلداجی و همکاران (Naderi-Boldaji *et al.*, 2015) با استفاده از روش طیفسنجی توان دی‌الکتریک به اندازه‌گیری غیرمخرب غلظت قند در نیشکر پرداختند. این محققان از یک خازن صفحه موازی و یک دستگاه مولد تابع موج سینوسی با بسامد بین صفر تا ۱۰ مگاهرتز استفاده کردند. رگرسیون خطی چندگانه

در اجرا با تعداد نمونه زیاد به منظور پایش پیوسته فرایند استحصال با محدودیت مواجه است. از این رو با توجه به پیشینه مطالعات در استفاده از روش دی‌الکتریک برای سنجش عیار قند در چغندر قند، نیشکر و تمایز محلول‌های با قندهای مختلف، هدف مطالعه حاضر توسعه و امکان‌سنجی روش طیف‌سنجی دی‌الکتریک در محدوده بسامد صفر تا ۱۰۰ مگاهرتز با استفاده از یک حسگر صفحه موازی استوانه‌ای برای اندازه‌گیری غلظت ساکاروز نیشکر شرید شده برای به کارگیری در کارخانه‌های قند است. این امکان‌سنجی با یک حسگر دی‌الکتریک استوانه‌ای با اعمال تراکم بر نمونه‌ها صورت گرفته است. در مقایسه با مطالعه قبلی روی ساقه نیشکر به طور غیرمخرب (Naderi-Boldaji *et al.*, 2015)، نوآوری مطالعه حاضر را می‌توان در ارزیابی روش دی‌الکتریک برای سنجش ویژگی‌های نیشکر الیافی شده دانست که یک ماده متخلخل تراکم‌پذیر است، همچنین در ارزیابی قدرت پیشگویی غلظت ساکاروز به عنوان دقیق‌ترین معیار سنجش عیار قند، در مقایسه با شاخص‌های بریکس و Pol عنوان کرد که ساده‌تر اندازه‌گیری می‌شوند ولی توأم با خطای سنجش هستند.

مواد و روش‌ها

اصول نظری روش طیف‌سنجی توان دی‌الکتریک

ظرفیت خازنی معیاری از توانایی ذخیره بار الکتریکی است که برای یک خازن با صفحات موازی با رابطه ۱ بیان می‌شود:

$$C = \epsilon_r \frac{A}{d} \times (8.854 \times 10^{-12}) \quad (1)$$

که در آن،

برای درجه Brix و درصد Pol نیشکر به عنوان تابعی از توان دی‌الکتریک در ۲۵ بسامد در بازه صفر تا ۱۰ مگاهرتز نتایج پیش‌بینی بسیار دقیقی را نشان داد. در پژوهشی دیگر، تعیین مقدار قند موجود در محلول در محدوده بسامد ۵۰۰ مگاهرتز تا ۱۱ گیگاهرتز گزارش شد. در این مطالعه، برای تعیین غلظت شکر سفید و قهوه‌ای با غلظت صفر تا ۴۰ درصد از روش دی‌الکتریک استفاده شد. نتایج به دست آمده از این روش با استفاده از پروب کواکسیال نشان داد که طیف‌سنجی دی‌الکتریک به عنوان روشی کم‌هزینه برای اندازه‌گیری غلظت قند در محلول کارآست (Thomason & Bialkowski, 2019).

یکی از موارد بسیار مهم در فرایند استحصال قند در کارخانه‌های تولید شکر (ساکاروز)، ارزیابی بازدهی استحصال ساکاروز است. برای این منظور نیاز است تا در ابتدای فرایند یعنی ورود نیشکر شرید شده (الیافی شده با شریدر)، مقدار ساکاروز اندازه‌گیری شود. رویکرد متداول برای اندازه‌گیری ساکاروز در کارخانه‌های قند نمونه‌برداری‌های چند ساعته از نیشکر شرید شده، تهیه نمونه عصاره و اندازه‌گیری مقدار ساکاروز با روش پلاریمتری است. از طرفی، بسته به درجه رسیدگی و زمان برداشت نیشکر و اینکه برخی ارقام زودرس هستند، بخشی از قند موجود در نیشکر به شکل قند اینورت (گلوکز و فروکتوز) است که به دلیل چرخش برگردان نور پلاریزه باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری ساکاروز می‌شود. برای اصلاح اندازه‌گیری، روش پلاریمتری مضاعف^۱ اجرا می‌گردد که در آن درصد ساکاروز به شیوه‌ای دقیق‌تر تعیین می‌گردد. در مجموع، اجرای این روش‌های اندازه‌گیری هزینه‌بر و زمان‌بر است و

توان مصرفی خازن را می‌توان با رابطه ۳ بیان کرد:

$$P = \frac{V^2}{2X_c} \quad (3)$$

که در آن،

P = توان دی‌الکتریک (وات)؛ V = بیشینه ولتاژ سینوسی اعمال شده به صفحات خازن (ولت)؛ و X_c = مقاومت ظاهری خازن (اهم) که از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad (4)$$

با جایگذاری رابطه ۱ و ۴ در رابطه ۳، توان خازن به دست می‌آید (Bagheri et al., 2014).

$$P = (8.854 \times 10^{-12})\pi\epsilon_r V^2 f \frac{A}{D} \quad (5)$$

طیف‌سنجی دی‌الکتریک برای سنجش ضریب دی‌الکتریک و فاکتور افت به طور مستقل و تابعی از بسامد نیازمند تجهیزات الکترونیکی آزمایشگاهی شامل تحلیل گر امپدانس^۲ یا تحلیل گر برداری شبکه^۳ است که دستگاه‌های گران‌قیمتی هستند. سادگی روش طیف‌سنجی توان دی‌الکتریک در امکان استفاده از تحلیل گر طیف^۴ در ترکیب با یک مولد سیگنال است. هوگ آنتونیوک و همکاران (Hoog-Antonyuk et al., 2012) با طراحی یک حسگر دی‌الکتریک استوانه‌ای و ترکیب مولد سیگنال و تحلیل گر طیف سامانه‌ای را برای سنجش کیفیت آب توسعه دادند. خلیلیان و همکاران (Khalilian et al., 2017) با طراحی یک حسگر مشابه آن را برای سنجش بریکس شربت چغندر قند ارزیابی کردند. توانایی این روش اندازه‌گیری دی‌الکتریک یا با حسگر استوانه‌ای مایع،

C = ظرفیت خازن (فاراد)؛ A = مساحت صفحات خازن (متر مربع)؛ d = فاصله بین دو صفحه (متر)؛ و ϵ_r = ضریب دی‌الکتریک (گذردهی) نسبی. به طور کلی، ضریب دی‌الکتریک به شکل یک کمیت فیزیکی مختلط توصیف می‌شود که از دو قسمت حقیقی و موهومی تشکیل شده است (رابطه ۲):

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (2)$$

که در آن،

ϵ_r = ضریب گذردهی نسبی؛ ϵ_r' = بخش حقیقی یا ثابت دی‌الکتریک؛ ϵ_r'' = بخش موهومی؛ و $j = \sqrt{-1}$. قسمت حقیقی ضریب گذردهی دلالت دارد بر میزان توانایی ماده برای ذخیره‌سازی انرژی وقتی در مواجهه با میدان الکتریکی قرار می‌گیرد (Khaled et al., 2015; El Khaled et al., 2016; Haq et al., 2020). قطبش^۱ عامل اصلی ذخیره انرژی در ماده در معرض میدان الکتریکی است. قسمت موهومی ضریب گذردهی یا فاکتور افت دی‌الکتریک به اتلاف انرژی گفته می‌شود که عمدتاً در اثر هدایت الکتریکی یا تبدیل به انرژی حرارتی اتفاق می‌افتد (Vaezi Zadeh et al., 2018). هنگامی که ماده دی‌الکتریک در معرض میدان الکتریکی قرار می‌گیرد، مولکول‌های دو قطبی درون ماده تحت تأثیر میدان الکتریکی متناوب چرخش می‌کنند و با خطوط میدان همسو می‌شوند که این واکنش را قطبش می‌نامند. دو عامل هدایت الکتریکی در بسامدهای پایین (محدوده رادیویی) و اصطکاک مولکول‌ها با مولکول‌های مجاور در حین چرخش در بسامدهای بالا (محدوده میکروویو) از عوامل اصلی افت انرژی هستند (McCrum et al., 1967).

1- Polarization

2- Impedance Analyzer

3- Vector Network Analyzer

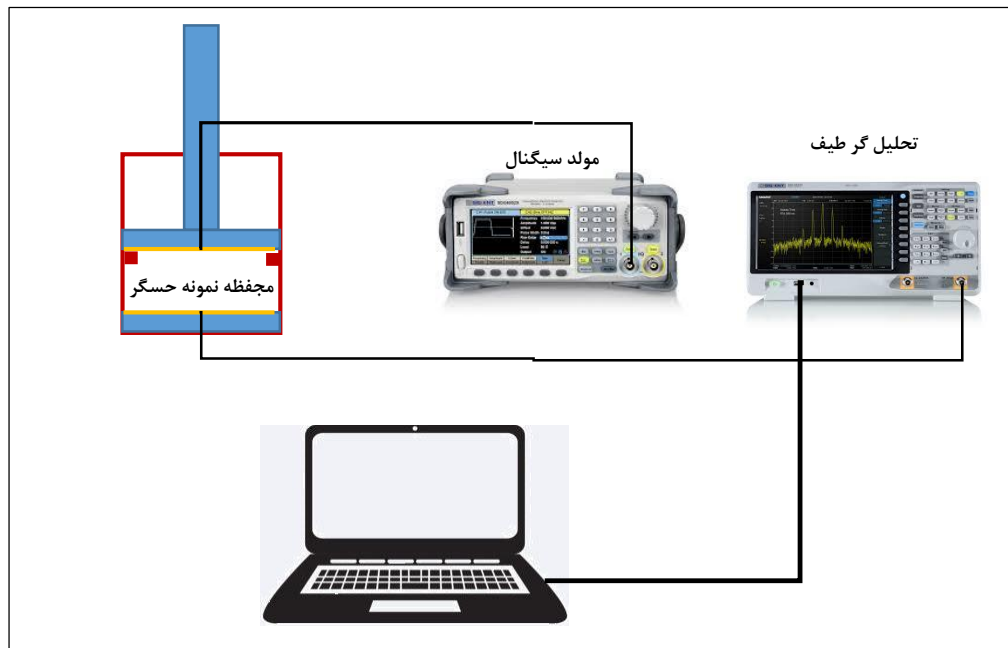
4- Spectrum Analyzer

که نمونه در محفظه حسگر قرار می‌گیرد می‌توان با اعمال نیرو روی پیستون حامل الکتروود بالایی، نمونه را متراکم کرد. از ورق آلومینیم با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر به عنوان الکتروودهای خازن استفاده شد که پس از نصب الکتروودها در کف سیلندر و روی پیستون سیم‌کشی حسگر با استفاده از کابل هم‌محور^۱ با امپدانس مشخصه ۵۰ اهم صورت گرفت. الکتروودها از یک طرف به دستگاه مولد تابع با بسامد صفر تا ۱۰۰ مگاهرتز (Ag-4151, Owon, Hong Kong) و از طرف دیگر به دستگاه تحلیل گر طیف (GSP-827, GW Instek, Taiwan) متصل شد (شکل ۱). در نواحی از طیف قبل از ۱۰ مگاهرتز جاروب بسامد با فاصله ۰/۵ مگاهرتز و تا ۱۰۰ مگاهرتز با فاصله ۱ مگاهرتز انجام شد. توان دی‌الکترونیک مجموعاً در ۱۱۰ بسامد با دستگاه تحلیل گر طیف اندازه‌گیری و با نرم‌افزار دستگاه روی کامپیوتر ثبت شد.

حسگرهای صفحه موازی و یا حسگر دی‌الکترونیک مجاورتی در مجموعه مطالعاتی برای سنجش کیفیت مواد غذایی و محصولات کشاورزی ارزیابی شده است (Mireei *et al.*, 2016; Ghatreh-Samani *et al.*, 2017; Naderi-Boldaji *et al.*, 2018; Keyvani *et al.*, 2021; Asadi *et al.*, 2023; Naderi-Boldaji *et al.*, 2023)

حسگر دی‌الکترونیک استوانه‌ای و سامانه اندازه‌گیری

به دلیل ساختار متخلخل نیشکر شرید شده، توسعه حسگر دی‌الکترونیک استوانه‌ای با امکان تراکم نمونه قبل از اندازه‌گیری مد نظر قرار گرفت. این حسگر متشکل از یک سیلندر به قطر ۷۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۳۰ میلی‌متر است که در کف آن یکی از الکتروودها (به شکل دایره‌ای) و به صورت ثابت نصب شده است. الکتروود دیگر روی یک پیستون از جنس تفلون نصب شد که هم قطر با سیلندر است و زمانی



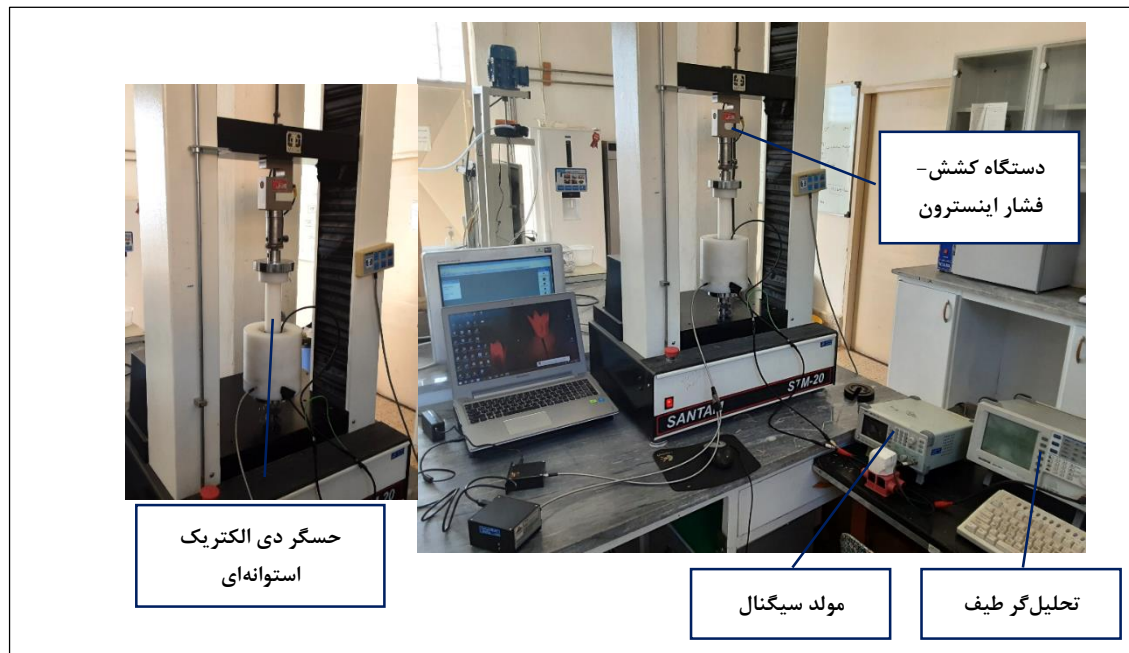
شکل ۱ - سامانه اندازه‌گیری و نحوه اتصال حسگر به مولد سیگنال و تحلیل گر طیف

Fig. 1- The measurement system and connection of the sensor to the function generator and spectrum analyzer

آزمون تراکم نیشکر شرید شده و تغییرات طیف دی الکتریک با تراکم نمونه

پیش از اندازه گیری نمونه های اصلی، آزمون تراکم نمونه برای دستیابی به طیف های دی الکتریک پایدار با احتمال همگرایی طیف های دی الکتریک با افزایش تراکم بررسی شد. با این حال، با توجه به مقدار بالای رطوبت نمونه ها (حدود ۷۰ درصد وزن مرطوب)، اعمال تراکم زیاد می تواند باعث خروج عصاره نیشکر از نمونه و فضای بین الکترودها و ایجاد خطا در اندازه گیری نمونه ها شود. از این رو با تهیه

یک نمونه چند کیلوگرمی نیشکر شرید شده از رقم CP57 با رطوبت ۷۰ درصد آزمون تراکم نمونه در محفظه حسگر تحت نیروی فشاری دستگاه آزمون کشش- فشار اینسترون اجرا شد و طیف های دی الکتریک در هر سطح تراکم از نمونه اندازه گیری و مقایسه شدند (شکل ۲). با ریختن ۸۰ گرم نیشکر شرید شده در محفظه حسگر و اعمال تراکم در ۶ گام با کنترل جابه جایی توسط دستگاه اینسترون، طیف های دی الکتریک در هر سطح تراکم ثبت شد.



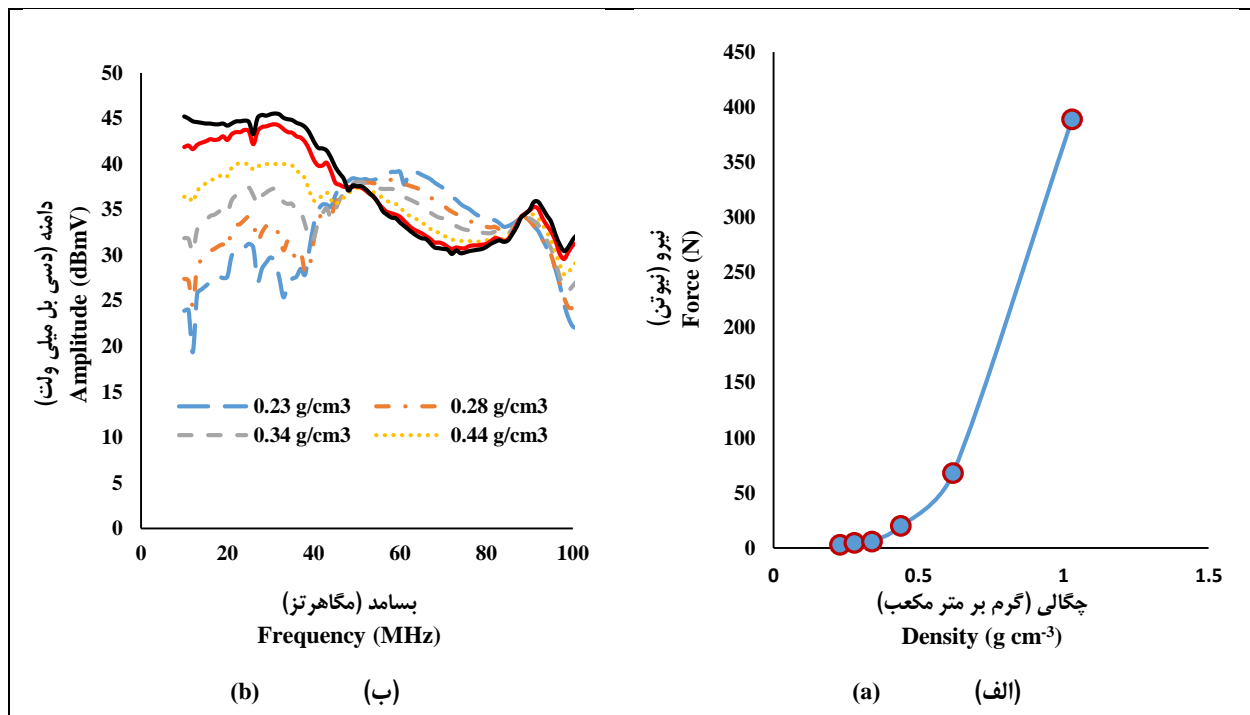
شکل ۲- آزمون تراکم نمونه نیشکر شرید شده در حسگر استوانه ای و تأثیر تراکم بر تغییرات طیف های دی الکتریک
 Fig. 2- The compaction test of shredded cane sample in the cylindrical sensor and its effect on variations in dielectric spectra

شرید شده، نحوه متفاوت اتصال قطب منفی (شیلد) کابل های هم محور به مدار است، ولی طیف های حاصل از نظر تأثیر تراکم بر روند تغییرات طیف ها قابل مقایسه و نتیجه گیری هستند. مشخص است که با افزایش میزان چگالی ظاهری تا حدود ۱ گرم بر سانتی متر مکعب، نیروی تراکم مورد نیاز نیز تا حد

شکل ۳- الف نمودار تغییر در چگالی ظاهری (نسبت وزن مرطوب نمونه به حجم محفظه حسگر) بر حسب نیروی تراکم و شکل ۳- ب طیف های دی الکتریک در سطوح مختلف تراکم را نشان می دهد. دلیل تفاوت در شکل طیف های دی الکتریک نسبت به طیف های حاصل از نمونه های اصلی نیشکر

نمونه، سطح چگالی ۰/۷۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب در فاصله ۲۰ میلی‌متری الکترودهای حسگر به عنوان سطح تراکم برای اندازه‌گیری نمونه‌های اصلی نیشکر در نظر گرفته شد. این سطح از تراکم با ریختن ۷۰ گرم نمونه مرطوب در حجم فضای دو الکتروود حاصل می‌شود. بنابراین با ماشین کاری یک پله در سطح داخلی سیلندر تفلونی، محفظه حسگر به نحوی طراحی شد که فاصله الکترودهای حسگر در ۲۰ میلی‌متر ثابت شود. برای حصول اطمینان از رسیدن الکترودها به این فاصله در همه نمونه‌ها و با در نظر گرفتن تغییرات احتمالی در مقاومت تراکمی نمونه‌های مختلف نیشکر شرید شده، نیروی معادل ۵۰ کیلوگرم به عنوان نیروی تراکم در نظر گرفته شد که با قرار دادن وزنه‌های استاندارد روی پیستون متصل به الکتروود متحرک اعمال شد.

۴۰۰ نیوتن (۴۰ کیلوگرم) افزایش یافته است. با افزایش تراکم، طیف‌های دی‌الکتریک به هم نزدیک‌تر و همگرا شده‌اند با این حال حتی تغییر جزئی در میزان تراکم توام با تغییر فاصله بین الکترودهای حسگر و تغییر ظرفیت خازنی خواهد بود. از این رو اساساً نمی‌توان انتظار داشت که با افزایش تراکم، طیف‌های دی‌الکتریک کاملاً بر هم منطبق شوند. ناپایداری طیف‌ها در تراکم‌های کوچک‌تر با وقوع دره‌های ناگهانی در طیف را احتمالاً می‌توان با وجود حفره‌های هوای بزرگ در نمونه‌ها مرتبط دانست. با اعمال نیروی تراکم بر نمونه تا حد ۴۰۰ نیوتن، خروج عصاره از نمونه مشاهده نشد. از این رو با توجه به احتمال تغییر در رفتار تراکمی نمونه‌های حاصل از ارقام مختلف نیشکر با تغییر در میزان رطوبت و میزان نرمی یا خشبی بودن الیاف



شکل ۳- الف) نمودار نیرو- چگالی ظاهری مرطوب حاصل از آزمون تراکم نمونه نیشکر شرید شده و ب) طیف‌های دی‌الکتریک حاصل از حسگر استوانه‌ای در سطوح مختلف تراکم

Fig. 3- a) The force- wet bulk density graph of compaction test of shredded cane sample and b) the resulting dielectric spectra at different levels of compaction

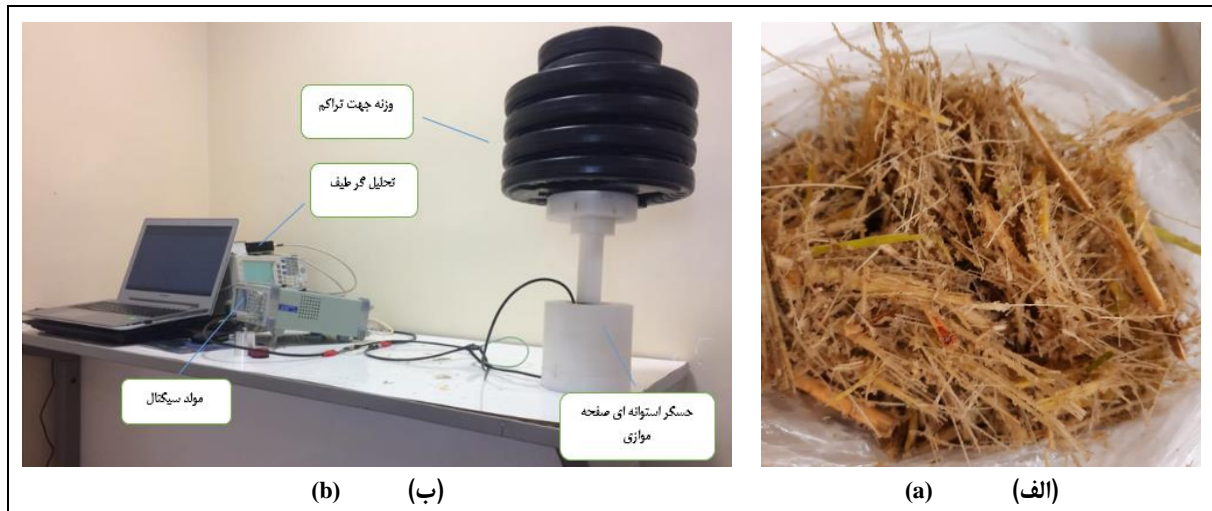
مکان اجرای آزمایش و روش تهیه نمونه‌ها

نمونه‌های مربوط به این مطالعه از کارخانه قند سلمان فارسی و محدوده کشت و صنعت این کارخانه و واحدهای اطراف در استان خوزستان گردآوری شد. نمونه‌ها از ارقام مختلفی از نیشکر مانند CP57-614 (رقم زودرس)، CP69-1062 (رقم میان‌رس)، CP48-103 و IRC99-02 (نمونه‌های دیررس) تهیه شدند که زمان برداشت آنها نیز متفاوت است. در ابتدا رقم زودرس CP57-614 برداشت می‌شود و پس از آن CP69-1062 و در انتها ارقام دیررس. در این واحد کشت و صنعت و در روزهای فعال برداشت، روزانه به طور میانگین در حدود ۱۰۰۰۰ تن نیشکر برداشت و تحویل کارخانه می‌گردد. این در حالی است که در بخشی از فصل برداشت به دلیل بارندگی گاهی برداشت تا چند هفته متوقف می‌شود و کارخانه شکر تولید نمی‌کند.

نیشکر وارد شده به کارخانه پس از توزین، روی دستگاه نقاله مخصوص تخلیه می‌گردد و به سمت محل فرآیند انتقال می‌یابد. در فرآیند آماده‌سازی نیشکر برای استحصال شکر دستگاه‌های متفاوتی استفاده می‌شوند که در ابتدا دستگاه برش و خردکن (شریدر) است. دستگاه برش نیشکر شامل دو تیغه برنده است که در بالای نقاله نصب می‌شوند و نیشکر را به قطعات کوچک برش می‌دهند. قطعات نیشکر پس از آن وارد دستگاه خردکن می‌شوند و به شکل الیاف درمی‌آیند (شکل ۴-الف). از نیشکر شرید شده در فرآیند، نمونه‌هایی مختلف برداشت شد و ضمن

اختلاط، بخشی از آن برای اندازه‌گیری خصوصیات مرجع به آزمایشگاه کنترل کیفی کارخانه سلمان فارسی برده شد و بخش دیگر شامل سه نمونه برای اندازه‌گیری با روش دی‌الکتریک استفاده گردید.

نمونه‌های نیشکر شرید شده هر یک به جرم ۷۰ گرم با سه تکرار روزانه از خط فرآوری کارخانه قند سلمان فارسی استان خوزستان به محل اندازه‌گیری‌های دی‌الکتریک در موسسه تحقیقات و آموزش نیشکر و صنایع جانبی در نزدیکی کارخانه قند انتقال یافتند. این کار در فصل برداشت به جز روزهایی اجرا می‌شد که برداشت و فرایند تولید به دلیل بارندگی متوقف می‌شد بود. در مجموع، امکان اندازه‌گیری ۵۵ نمونه از آغاز فصل برداشت در اواخر مهرماه ۱۴۰۰ تا پایان فصل برداشت در پایان اسفند ۱۴۰۰ حاصل شد. برای جلوگیری از هر گونه تغییر در ویژگی نمونه‌ها در روز اندازه‌گیری، نمونه‌ها درون یخچال قرار گرفتند و هر نمونه یک ساعت قبل از اندازه‌گیری، از یخچال بیرون گذاشته می‌شد تا دمای آن به دمای محیط برسد. با ریختن نمونه در محفظه حسگر به شکل یکنواخت و قراردادن الکتروود متحرک در محفظه حسگر و قراردادن وزنه‌های تراکمی روی الکتروود متحرک اندازه‌گیری هر نمونه دنبال شد و پس از با خارج کردن نمونه از محفظه حسگر و خشک کردن فضای درون محفظه، اندازه‌گیری روی نمونه بعدی اجرا گردید. شکل ۴ تصویری از نیشکر شرید شده و سامانه اندازه‌گیری دی‌الکتریک در حین آزمون را نشان می‌دهد.



شکل ۴- الف) نمونه نیشکر شرید شده و ب) سامانه عملیاتی اندازه‌گیری دی‌الکتریک و وسایل مورد استفاده
 Fig. 4- a) Shredded cane sample and b) the operational setup of dielectric measurement and used devices

روش‌های اندازه‌گیری خصوصیات مرجع

اندازه‌گیری رطوبت نیشکر

۳۰۰ گرم نیشکر شرید شده به مدت ۳۰ دقیقه درون دستگاه خشک‌کن (Cane/Bagasse Drying Oven, Sugarequip Pty Ltd, South Africa) با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار داده شد. پس از آن وزن خشک نمونه اندازه‌گیری و درصد رطوبت بر پایه تر (W%) با استفاده از رابطه ۶ محاسبه شد:

$$W = 100 \times \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \quad (6)$$

که در آن،

m_0 = وزن ظرف (گرم)؛ m_1 = مجموع وزن نمونه مرطوب و ظرف (گرم)؛ و m_2 = مجموع وزن نمونه خشک و ظرف (گرم).

اندازه‌گیری بریکس، Pol و غلظت ساکاروز در نیشکر

۲۰۰۰ گرم نمونه نی شرید شده داخل دستگاه جداکننده الیاف (JEFFCO, WD02, Australia) قرار داده شد. به ازای هر ۱۰۰۰ گرم نی شرید شده، ۳ لیتر آب به نمونه اضافه شد. بعد از گذشت ۲۰ دقیقه، شربت ایجاد شده در دستگاه به

آزمایشگاه منتقل شد و مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. دو گرم استات سرب قلیایی به ۲۰۰ میلی‌لیتر شربت اضافه شد و پس از به هم زدن، با کاغذ صافی درجه ۵۹۵ (۴/۷ میکرومتر) صاف شد. چند قطره اول شربت مخلوط شده با استات سرب دور ریخته شد زیرا این قطره‌ها معمولاً کدر هستند و باعث ایجاد خطا در قرائت عدد دستگاه پلاریمتر می‌شوند. شربت حاصل درون دستگاه پلاریمتر (Schmidt, Z103, Germany) ریخته شد و عدد حاصل از چرخش نوری، Pol خوانده شده (P_{red}) شربت نامیده می‌شود. پس از آن، یک نمونه از شربت درون دستگاه رفرکتومتر (Schmidt, ATR, Germany BR) ریخته شد که عدد حاصل Brix خوانده شده (B_{red}) شربت نامیده می‌شود. با تعیین فاکتور pf از جدول‌های تصحیح و با استفاده از رابطه‌های ۷-۹، شاخص‌های بریکس نیشکر ($Brix_{cane}$) و Pol نیشکر (Pol_{cane}) به ترتیب بیانگر وزن مواد جامد انحلال‌پذیر و ساکاروز در واحد وزن نیشکر شرید شده محاسبه شد (De Whalley, 1964).

پلاریمتر عدد Pol آن قرائت شد که این بار عددی منفی بود زیرا مولکول‌های ساکاروز در اثر حرارت و اسیدی شدن محیط به گلوکز و فروکتوز (مجموعاً تحت عنوان قند اینورت) شکسته شده‌اند و این بار چرخش نور چپ گرد خواهد بود. اعداد به دست آمده از دو نمونه در رابطه ۱۱ قرار داده شد و درصد ساکاروز (S) بیانگر وزن ساکاروز در واحد وزن نیشکر شرید شده محاسبه گردید (Chen & Chou, 1993):

$$S = \frac{100(P-P^*)}{132.63+0.0794(M-13)-0.53(T-20)} \quad (11)$$

که در آن،
 P = پلاریزاسیون مثبت پیش از وارونه‌سازی؛ P^* = پلاریزاسیون منفی بعد از وارونه‌سازی؛ T = دمای قرائت شدهٔ محلول؛ و M = میزان مواد جامد (بر حسب گرم) در ۱۰۰ ml محلول که با استفاده از جدول‌های مرجع و با توجه به بریکس شربت تعیین می‌شود.

تحلیل‌های آماری

برای تحلیل‌های آماری و توسعهٔ مدل‌های پیش‌بینی، از نرم‌افزار Unscrambler X10.6 استفاده شد. طیف‌های دی‌الکتریک حاصل از سه تکرار برای هر نمونه میانگین گرفته شد و طیف میانگین به عنوان طیف مربوط به آن نمونه تحلیل شد. در ابتدا، با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی و برازش بیضی $Hotteling T^2$ در سطح اطمینان ۹۵ درصد طیف‌های پرت (نامتشابه) کشف و از مجموعه داده‌ها خارج شد. دیدگاه این روش در راستای شناسایی طیف‌های نامتشابه، بر اساس روش خوشه‌بندی سلسه مراتبی برای به دست آوردن مجموعه‌ای با ثبات از مشاهدات بنا شده است. فرض روش بر این

$$Brix_{cane} = Brix_{red} \frac{220 + w}{80 - p} \quad (7)$$

$$p = p_f * p_{red} \quad (8)$$

$$Pol_{cane} = p \frac{220+W}{80 - B_{red}} \quad (9)$$

با استفاده از رابطه ۱۰ نیز درصد فیبر نمونه (F) محاسبه شد:

$$F=100 \frac{100-W-4 B_{red}}{100-1.25 B_{red}} \quad (10)$$

برای اندازه‌گیری دقیق‌تر غلظت ساکاروز، از روش پلاریمتری مضاعف استفاده شد. در این روش، ابتدا دو نمونه ۵۰ میلی‌لیتری شربت شفاف شده آماده شد. به نمونهٔ اول ۱۰ میلی‌لیتر سدیم کلرید (NaCl) اضافه و پس از آن با اضافه کردن آب حجم نمونه به ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. نمونه با استفاده از کمک صافی (خاک فسیل) صاف شد و سپس با دستگاه پلاریمتر، عدد Pol آن قرائت شد که عددی مثبت است. ساکاروز به دلیل داشتن کربن نامتقارن در ساختار خود دارای فعالیت نوری است و نور قطبیده را به سمت راست می‌چرخاند، از این پدیده برای اندازه‌گیری مقدار ساکاروز در محلول استفاده می‌شود. برای تغییر چرخش نوری (چپ گرد)، باید وارونه‌سازی^۱ صورت گیرد. وارونه‌سازی در حضور اسید و حرارت عملی می‌شود. از این‌رو، به یک نمونهٔ دیگر شربت ۱۰ میلی‌لیتر هیدروکلریک اسید (HCl) اضافه شد، با این تفاوت که این نمونه به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب گرم با دمایی بین ۶۵ تا ۷۰ درجهٔ سلسیوس قرار داده شد. پس از ۳۰ دقیقه، حجم نمونه به ۱۰۰ میلی‌لیتر و دمای آن نیز به دمای نمونه اول رسانده شد و با استفاده از کمک صافی (خاک فسیل)، نمونه صاف و با دستگاه

مقاطع یگانه روش مرسوم برای اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیونی در مواقعی است که تعداد نمونه‌ها محدودیت دارد. در این روش، با کنار گذاشتن یک نمونه، مدل پیش‌بینی با نمونه‌های باقیمانده آموزش دیده نمونه کنار گذاشته شده را پیش‌بینی می‌کند و این الگوریتم برای دیگر نمونه‌ها تکرار می‌شود. با این حال، مدل‌ها با مجموعه نمونه‌های مستقل که قبلاً در آموزش مدل‌ها استفاده نشده‌اند به شکلی دقیق اعتبارسنجی شدند.

در نهایت، دقت مدل‌های پیشگو با استفاده از پارامترهای آماری مانند ضریب تعیین (R^2) (رابطه ۱۱)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) (رابطه ۱۲) و انحراف پیشگوی باقیمانده (RPD) (رابطه ۱۴) ارزیابی شد. RPD پارامتری نرمال در ارزیابی مدل‌های رگرسیون محسوب می‌شود، با تقسیم انحراف استاندارد (SD) (رابطه ۱۵) مقادیر مرجع بر $RMSE_p$ برای زیر مجموعه آزمون تعریف می‌شود. در صورتی که مقدار RPD کمتر از یک باشد، توانایی پیش‌بینی مدل بسیار ضعیف است، بین ۱/۵-۱ ضعیف، بین ۲-۱/۵ خوب و RPD از ۲ تا ۲/۵ قدرت پیش‌بینی بسیار خوب و بالاتر از ۲/۵ را می‌توان عالی تفسیر کرد (Williams & Norris, 2001).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \right]^2 \quad (12)$$

$$RMSE_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (13)$$

$$RPD = \frac{SD}{RMSE_p} \quad (14)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N-1}} \quad (15)$$

اساس است که ابتدا مجموعه Xm^*p متشکل از m مشاهده با بعد p و دارای توزیع نرمال چند متغیره با میانگین μ و واریانس Σ ، در نظر گرفته می‌شود. در مرحله اول روی مجموعه داده Xm^*p خوشه‌بندی سلسه مراتبی اعمال می‌شود. پس از آن بزرگ‌ترین خوشه از داده‌ها که کمترین ناهمسانی را با هم دارند انتخاب می‌شود و میانگین و واریانس این خوشه به عنوان برآوردگر میانگین و ماتریس واریانس در آماره T^2 قرار داده می‌شود. حال، مقدار T^2 برای تمامی m مشاهده محاسبه می‌شود و پس از انتخاب حدود کنترلی، مشاهده‌ای که از حد بالای کنترل تجاوز می‌کند، به عنوان داده پرت و غیرمعمول معرفی خواهد شد.

برای توسعه مدل‌های پیشگو از روش‌های رگرسیونی چند متغیره حداقل مربعات جزئی (PLSR)^۱، رگرسیون مولفه‌های اصلی (PCR)^۲ و رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)^۳ به منظور مقایسه و انتخاب بهترین روش استفاده شد. دو نوع بردار پشتیبان اپسیلون^۴ و نو^۵ هر یک با دو تابع کرنل خطی و شعاعی^۶ ارزیابی شدند. نظر به محدودیت در تعداد روزهای برداشت در یک فصل و نهایتاً تعداد نمونه‌های حاصل (۵۴ نمونه مفید)، از حدود ۸۰ درصد نمونه‌ها (شامل ۴۳ نمونه) برای آموزش و اعتبارسنجی درونی مدل با روش اعتبارسنجی مقاطع یگانه^۷ و از بقیه نمونه‌ها شامل ۱۱ نمونه با انتخاب تصادفی برای اعتبارسنجی بیرونی استفاده شد. با مقایسه نتایج حاصل از اعتبارسنجی درونی انواع مدل‌ها، بهترین روش رگرسیونی مورد اعتبارسنجی بیرونی قرار گرفت. روش اعتبارسنجی

1- Partial Least Squares Regression

3- Support Vector Regression

5- Nu

7- Leave-One-Out Validation

2- Principal Component Regression

4- Epsilon

6- Radial Bias Function (Rbf)

8- Residual Predictive Deviation

نمونه‌ها نسبتاً محدود و در حد ۴ درصد بود. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، میانگین ساکاروز کمی از درصد Pol کوچک‌تر است که به دلیل خطای سنجش ساکاروز با شاخص Pol به واسطه حضور قند اینورت است. نمونه‌های اندازه‌گیری شده اغلب از رقم CP69-1062 و تعداد اندکی CP57-614 و بقیه از رقم CP48-103 یا ترکیبی از ارقام CP69-1062 و CP48-103 با رقم IRC99-02 بودند. بررسی توزیع فراوانی داده‌ها نشان می‌دهد ساکاروز اکثر نمونه‌های نیشکر در محدوده ۱۳/۵-۱۱/۵ درصد، ۶ نمونه در محدوده کمتر از ۱۰ درصد و ۳ نمونه با ساکاروز بالاتر از ۱۳/۵ درصد بوده‌اند. این محدوده تغییرات تحت تأثیر ارقام وارد شده به کارخانه طی فصل برداشت است.

که در آنها،
 $y_1 =$ مقادیر اندازه‌گیری شده (مرجع)؛ $\hat{y}_1 =$ مقادیر اندازه‌گیری شده پیش‌بینی؛ $\bar{y} =$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده؛ $\bar{\hat{y}} =$ میانگین مقادیر پیش‌بینی شده؛ و $N =$ تعداد داده.

نتایج و بحث

آمار توصیفی نمونه‌های نیشکر شرید شده

جدول ۱، آمار توصیفی خصوصیات مرجع مربوط به ۵۵ نمونه نیشکر شرید شده را ارائه می‌دهد که در فصل برداشت ۱۴۰۰ و به شکل تصادفی انتخاب و سنجش شدند. میانگین مقدار ساکاروز نمونه‌ها ۱۱/۹۵ درصد با بیشینه ۱۵/۵۵ درصد و کمینه ۶/۷۹ بود. تغییرات رطوبت در

جدول ۱- آمار توصیفی خصوصیات مرجع ۵۵ نمونه نیشکر شرید شده

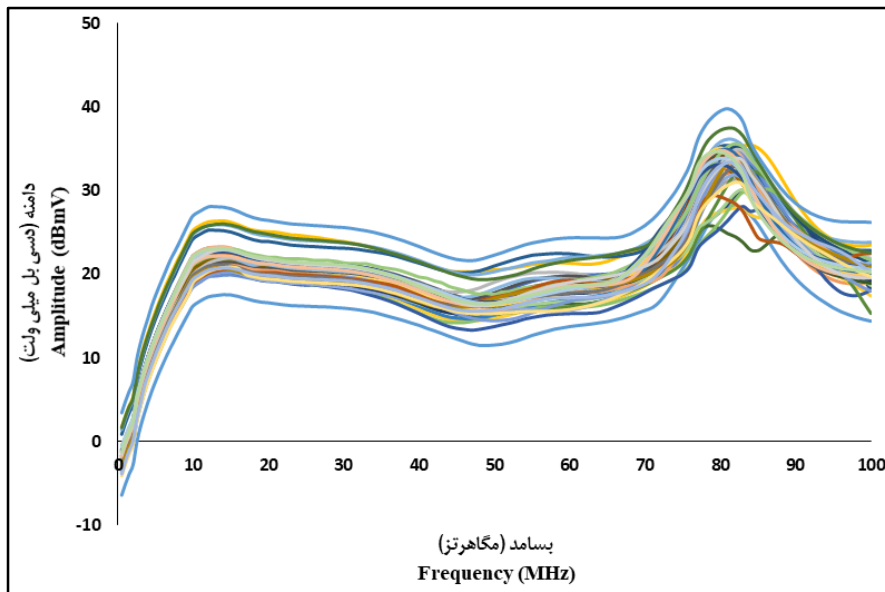
Table 1- Descriptive statistics of reference characteristics of 55 shredded sugarcane samples

مشخصه	فیبر (درصد)	رطوبت (درصد)	بریکس (درصد)	پل (درصد)	ساکاروز (درصد)
Characteristic	Fiber (%)	Moisture (%)	Brix (%)	Pol (%)	Sucrose (%)
میانگین	13.34	70.34	15.9	12.31	11.95
بیشینه	17.3	72.76	18.95	15.63	15.55
کمینه	11.11	68.63	11.05	7.26	6.79
انحراف معیار	1.18	0.73	1.4	1.44	1.47
Standard deviation					

روند تغییرات طیف‌ها

نمونه با غلظت ۱۵/۵۵ درصد و رطوبت ۶۸/۶۳ درصد است. اساساً، افزایش غلظت ساکاروز در عصاره نیشکر موجود در نمونه‌ها یا محلول آب- ساکاروز توام با کاهش ضریب دی‌الکتریک و فاکتور افت نمونه در طیف‌های اندازه‌گیری شده خواهد بود که باعث کاهش توان دی‌الکتریک نیز می‌شود (Alshami, 2007; Bakam Nguenouho *et al.*, 2022). پایداری طیف‌ها در نواحی پیش از ۵۰ مگاهرتز بهتر به نظر می‌رسد و با شروع روند افزایشی بعد از ۵۰ تا شکل‌گیری قله واقع در ۸۰ مگاهرتز طیف‌ها نوسان‌های بیشتری دارند.

شکل ۵، طیف‌های دی‌الکتریک حاصل از نمونه‌های نیشکر شرید شده تابعی از بسامد را بر حسب مگاهرتز نشان می‌دهد. برای حذف نویزهای جزئی موجود در طیف، میانگین متحرک (با سه نقطه میانگین‌گیری) روی طیف‌ها اعمال گردید. به طور کلی، با افزایش غلظت ساکاروز نمونه‌ها (حاصل تغییر میزان ساکاروز یا رطوبت) دامنه طیف‌ها رو به کاهش گذاشته است. بالاترین طیف مربوط به نمونه با غلظت ساکاروز ۶/۷۹ درصد و رطوبت ۷۲/۷۶ درصد و پایین‌ترین طیف مربوط به

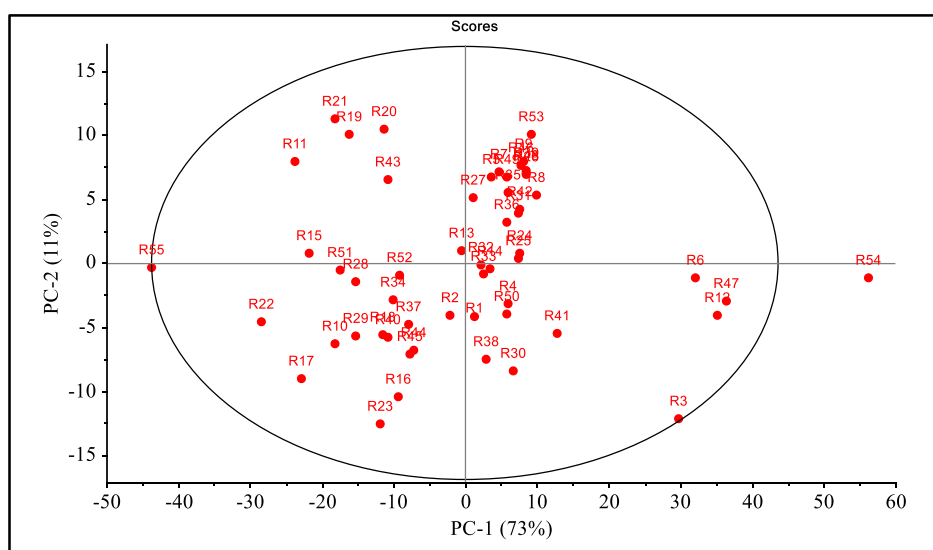


شکل ۵- طیف‌های دی‌الکتریک نمونه‌های نیشکر شریذ شده
 Fig. 5- Dielectric spectra of shredded cane samples

طیف نامتشابه^۱ قابل حذف است. طیف مذکور مربوط به تنها نمونه با غلظت ۱۵/۵۵ درصد است که دلیل نامتشابه بودن آن را می‌توان در تکرار نشدن نمونه با این محدوده مشخصات در نظر گرفت. بدین ترتیب ۵۴ طیف باقیمانده به منظور توسعه مدل‌های رگرسیونی تحلیل شدند.

کشف طیف‌های نامتشابه

شکل ۶، نتیجه تحلیل مولفه‌های اصلی روی ۵۵ طیف دی‌الکتریک و برازش بیضی Hotelling T^2 با سطح اطمینان ۹۵ درصد را نشان می‌دهد. دو مولفه اصلی مجموعاً ۸۴ درصد از واریانس طیف‌ها را توجیه کرده‌اند. مشخص است که یک طیف به عنوان



شکل ۶- تحلیل مولفه‌های اصلی طیف‌های دی‌الکتریک برای کشف طیف‌های نامتشابه
 Fig. 6 - Principal component analysis of dielectric spectra to find outliers

1- Outlier

نمونه‌هاست. میانگین این اختلاف در نمونه‌ها حدود ۰/۴ بود ولی بیشینه آن به ۱/۱ نیز رسید. ساکاروز، در مقایسه با گلوکز و فروکتوز، دارای تعداد گروه‌های OH بیشتری است و در انحلال با آب اثر کاهش بیشتری بر مشخصه‌های دی‌الکتریک محلول دارد (Alshami, 2007). به طور میانگین، ۷۵ درصد مواد جامد انحلال‌پذیر در نمونه‌ها ساکاروز است که می‌تواند توجیه‌کننده اثر غالب ساکاروز در ویژگی‌های دی‌الکتریک نمونه‌ها باشد. بر همین اساس، نتایج حاصل از بررسی‌های کیوانی و همکاران (Keyvani *et al.*, 2021) با استفاده از یک حسگر تشدیدگر استوانه‌ای قابلیت تمایز مطلوبی بین محلول‌های حاصل از قند ساکاروز، در مقایسه با قند اینورت، نشان داد که موید نتایج حاضر است. نادری بلداجی و همکاران (Naderi-Boldaji *et al.*, 2015) با استفاده از روش مشابه در محدوده بسامد ۱۰ مگاهرتز روی نمونه‌های ساقه نیشکر به شکل غیرمخرب با دامنه تغییرات Pol بین ۸/۶۷ تا ۱۹/۸۵ مدل پیش‌بینی با قدرت پیشگویی بسیار عالی (با RPD بزرگ‌تر از ۴) گزارش دادند. یک دلیل ضعیف‌تر بودن مدل‌ها در مطالعه حاضر را می‌توان در ساختار متفاوت نمونه‌ها، تغییرات محدودتر ویژگی‌های نیشکر دانست.

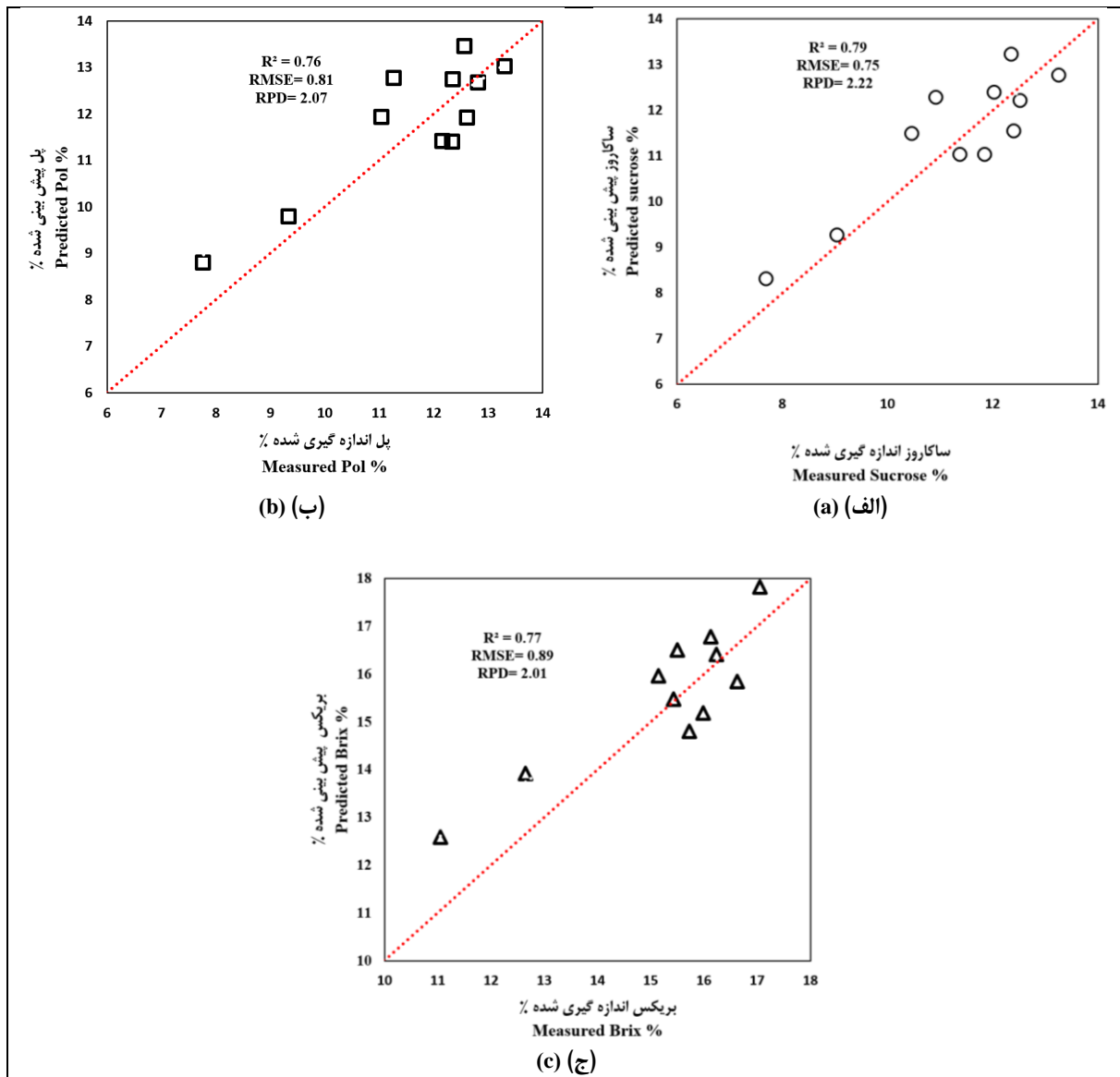
نتایج ارزیابی مدل‌های رگرسیونی پیش‌بینی شاخص‌های غلظت قند

جدول ۲، نتایج آموزش و اعتبارسنجی درونی انواع مدل‌های رگرسیونی را برای پیش‌بینی ساکاروز، Pol و بریکس نمونه‌ها با استفاده از طیف‌های دی‌الکتریک نشان می‌دهد. از بین روش‌های رگرسیونی، بهترین نتایج از روش PLSR و پس از آن از روش بردار پشتیبان نوع Nu با تابع کرنل شعاعی حاصل شده است. دیگر توابع کرنل روش بردار پشتیبان شامل SVM-Sigmoid و SVM-Polynomial نتایج ضعیف تری از توابع SVM-Linear و SVM-rbf را نشان دادند، از این‌رو در جدول ۲ نشان داده نشدند. مشخص است که مدل حاصل برای ساکاروز، نسبت به مدل به دست آمده برای Pol و بریکس، قدرت پیشگویی نسبتاً بالاتری دارد. شکل ۷، نتایج برآورد (اعتبارسنجی بیرونی) مدل‌های PLSR را برای غلظت ساکاروز، Pol و بریکس نشان می‌دهد. انحراف باقیمانده پیشگو (RPD) برای ساکاروز، Pol و بریکس به ترتیب ۲/۲۲ و ۲/۰۷ و ۲ به دست آمده که بیانگر مدل‌های نسبتاً خوب برای پیش‌بینی این شاخص‌هاست. با این حال، مدل حاصل برای ساکاروز قدرت پیشگویی قوی‌تری نشان داده است. اساساً، اختلاف بین ساکاروز و Pol به دلیل حضور قند اینورت (گلوکز و فروکتوز) در

جدول ۲- نتایج آموزش و اعتبارسنجی درونی مدل‌های رگرسیونی پیش‌بینی شاخص‌های غلظت قند

Table 2- The results of training and internal validation of regression models of sugar concentration characteristics

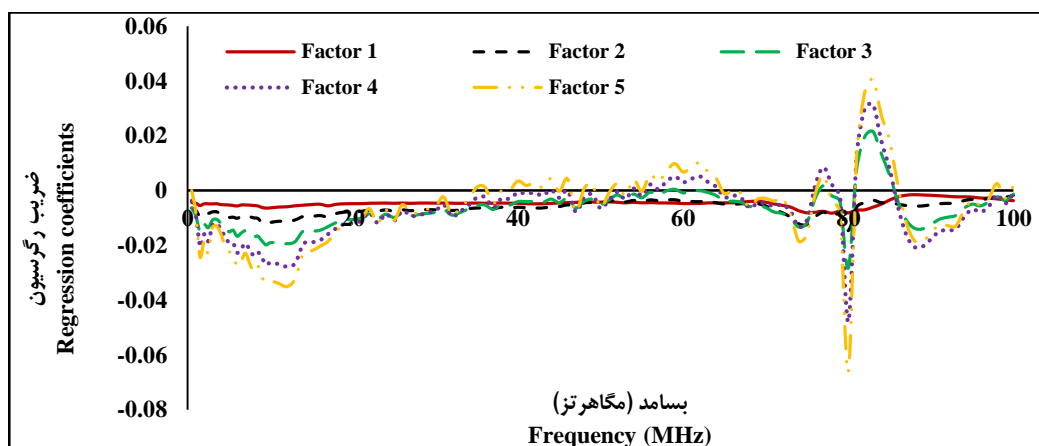
اعتبارسنجی متقاطع یگانه Leave-one-out validation			آموزش Training		مشخصه Characteristic	روش رگرسیون Regression method
R ²	RMSE	RPD	R ²	RMSE		
ضریب تعیین	ریشه میانگین مربعات خطا	انحراف پیشگو باقی مانده	ضریب تعیین	ریشه میانگین مربعات خطا		
0.79	0.59	2.21	0.89	0.42	ساکاروز % Sucrose%	PLSR
0.78	0.58	2.17	0.88	0.43	پل % Pol%	
0.71	0.64	1.87	0.87	0.422	بریكس % Brix%	
0.62	0.79	1.64	0.74	0.66	ساکاروز % Sucrose%	PCR
0.61	0.77	1.63	0.77	0.6	پل % Pol%	
0.56	0.78	1.52	0.66	0.69	بریكس % Brix%	
0.74	0.66	1.96	0.95	0.302	ساکاروز % Sucrose%	SVM-Ep-linear
0.68	0.72	1.74	0.95	0.293	پل % Pol%	
0.62	0.76	1.56	0.94	0.3	بریكس % Brix%	
0.76	0.664	1.96	0.87	0.49	ساکاروز % Sucrose%	SVM-Ep-rbf
0.75	0.678	1.85	0.85	0.51	پل % Pol%	
0.62	0.75	1.58	0.79	0.56	بریكس % Brix%	
0.62	0.86	1.5	0.98	0.18	ساکاروز % Sucrose%	SVM-Nu-linear
0.62	0.82	1.53	0.98	0.2	پل % Pol%	
0.54	0.84	1.44	0.97	0.21	بریكس % Brix%	
0.8	0.6	2.16	0.88	0.5	ساکاروز % Sucrose%	SVM-Nu-rbf
0.76	0.67	1.89	0.85	0.49	پل % Pol%	
0.61	0.76	1.56	0.79	0.56	بریكس % Brix%	



شکل ۷ - نتایج اعتبارسنجی مدل‌های پیش‌بینی (الف) ساکاروز، (ب) پل و (ج) بریکس با طیف‌های دی‌الکتریک و روش رگرسیونی PLSR
 Fig. 7- Validation results of PLSR prediction models a) Sucrose, b) Pol and c) Brix with dielectric spectra

پیش‌بینی ساکاروز را می‌توان نواحی صفر تا ۲۰ و نواحی اطراف ۸۰ مگاهرتز مشخص کرد. سنجش این نواحی طیفی با فاصله‌های بسامدی کوچک‌تر می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری از ویژگی نمونه‌ها به دست دهد که در بهبود دقت مدل‌های پیش‌بینی مؤثر باشد.

شکل ۸، ضریب‌های رگرسیونی فاکتورهای مختلف مدل PLSR در پیش‌بینی ساکاروز را تابعی از بسامد طیف نشان می‌دهد. فاکتورهای ۱ تا ۴ به ترتیب ۵۹، ۶۷، ۷۳، ۷۷ و ۷۹ درصد تجمعی از واریانس تغییرات ساکاروز را با استفاده از طیف‌های دی‌الکتریک توجیه کردند. نواحی طیفی قوی‌تر در



شکل ۸- ضریب‌های رگرسیونی فاکتورهای مدل پیش‌بینی ساکاروز تابعی از بسامد

Fig. 8- Regression coefficients of sucrose prediction model factors as a function of frequency

نتیجه‌گیری

مطالعه نشان می‌دهد قدرت پیشگویی ساکاروز نسبت به شاخص PoI یا بریکس با استفاده از طیف‌های دی‌الکتریک تا حدی بالاتر است که این موضوع را می‌توان تأثیر غالب ساکاروز بر خواص دی‌الکتریک نمونه در حضور مقداری قند اینورت توجیه کرد زیرا ساکاروز دارای تعداد گروه‌های OH بیشتری نسبت به قند اینورت است و بخش بزرگی از قند موجود در عصاره نیز ساکاروز است. ناحیه بسامدی صفر تا ۲۰ و اطراف ۸۰ مگاهرتز نواحی موثرتری در پیشگویی ساکاروز برای نمونه‌های نیشکر شرید شده است. بدین ترتیب جاروب این نواحی با فاصله‌های بسامدی کوچک‌تر می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری از نمونه به دست دهد و باعث بهبود دقت سنجش ساکاروز در نیشکر شرید شده باشد. ارزیابی دقیق‌تر این روش علاوه بر بهینه‌سازی‌های حسگر و سامانه اندازه‌گیری برای افزایش حساسیت، نیاز به آزمون نمونه‌های بیشتر در حدود پایین و بالای تغییرات ساکاروز خواهد بود. در صورت عملیاتی شدن روش اندازه‌گیری ارزیابی شده در این مطالعه در کارخانه‌های قند می‌توان برای اعمال تراکم روی نمونه قبل از اندازه‌گیری یک مکانیزم اعمال بار هیدرولیکی یا نیوماتیکی طراحی

در کارخانه‌های تولید قند از نیشکر، ماده ورودی به فرایند استحصال قند به شکل نیشکر شرید شده است. سنجش مقدار ساکاروز در این نقطه تعیین‌کننده میزان قند ورودی به فرایند استحصال است که بخشی از آن نیز نهایتاً به شکل ضایعات قندی در تفاله حاصل (باگاس) به جا می‌ماند. پیرو مجموعه مطالعات پیشین با روش دی‌الکتریک برای سنجش عیار قند در چغندر قند و ساقه نیشکر به شکل غیرمخرب، مطالعه حاضر با هدف امکان‌سنجی اندازه‌گیری ساکاروز به عنوان دقیق‌ترین شاخص عیارسنجی نیشکر روی نیشکر شرید شده به صورت یک ماده متخلخل به اجرا درآمد. صرف‌نظر از میزان هوا یا مقدار مواد فیبری که اساساً مواد دی‌الکتریک بسیار ضعیفی هستند، میزان عصاره موجود در نمونه، بسته به غلظت‌های مختلف قند، ماده مؤثر دی‌الکتریک در نظر گرفته می‌شود. نتایج ارزیابی این روش با یک حسگر دی‌الکتریک صفحه موازی استوانه‌ای با اعمال تراکم بر نمونه‌ها با سنجش ۵۵ نمونه نیشکر شرید شده از ارقام مختلف یا ترکیبی از ارقام توانمندی نسبتاً خوبی برای سنجش ساکاروز نشان داد. نتایج این

کرد. با طراحی یک مدار الکترونیکی برای تغذیه (با قابلیت جاروب فرکانس) و اندازه‌گیری خروجی حسگر می‌توان آن را جایگزین دستگاه‌های مولد سیگنال و تحلیل‌گر طیف کرد. نظر به اینکه اندازه‌گیری‌های متداول در آزمایشگاه کنترل کیفی کارخانه‌های قند روی نمونه عصاره مستخرج از نیشکر اجرا می‌شود و برای آماده‌سازی نمونه‌ها از مواد شیمیایی سمی مانند استات سرب استفاده می‌شود، ارزیابی روش دی‌الکتریک روی نمونه‌های عصاره نیشکر می‌تواند پیشنهادی مفید برای مطالعات آینده باشد. در صورت حصول دقت مورد نیاز برای سنجش نمونه‌های عصاره، می‌توان روش دی‌الکتریک را به طور ساده‌تر (و بدن نیاز به مکانیزم تراکم نمونه) به کار گرفت.

قدردانی

این مقاله مستخرج از طرح تحقیقاتی مشترک دانشگاه شهرکرد با موسسه تحقیقات و آموزش توسعه نیشکر و صنایع جانبی خوزستان است. از این موسسه برای حمایت و پشتیبانی در اجرای این مطالعه تشکر و قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

نویسندگان در خصوص مقاله ارائه شده به طور کامل از سوء اخلاق نشر، از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده‌اند و منافی تجاری در این راستا وجود ندارد.

مراجع

- Al Faruq, A., Zhang, M., Bhandari, B., Azam, S. R., & Khatun, M. H. A. (2019). New understandings of how dielectric properties of fruits and vegetables are affected by heat-induced dehydration: A review. *Drying Technology*, 37(14), 1780-1792. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1538157>.
- Alshami, A. S. (2007). *Dielectric properties of biological materials: a physical-chemical approach* (Ph. D. Thesis), Washington State University, USA.
- Arumugam, S., Theivaprakasham, H., Kamakshidevi, M. R., Suburaaj, R., & Sabarish, N. B. (2019). *Capacitance based Non-destructive technique for post-harvest sugarcane quality prediction. Proceedings of the 2019 9th International Symposium on Embedded Computing and System Design (ISED)*. Dec. 13-14. <https://doi.org/10.1109/ISED48680.2019.9096248>.
- Asadi, A., Naderi-Boldaji, M., Lotfalian, A., Ghasemi-Varnamkhasti, M., & Abdanan Mehdizadeh, S. (2023). Development and Evaluation of a Proximal Dielectric Sensor for Nondestructive Measurement of Sugar Concentration in Sugar Beet. *Agricultural Mechanization and Systems Research*, 23, 33-48. <https://doi.org/10.22092/amsr.2023.360854.1434>. (in Persian)
- Bagheri, R., Mireei, S. A., Sadeghi, M., Masoumi, A., & Mumksh, Sh. (2014). Measuring the moisture content of dates with a non-destructive dielectric method. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 45(2), 97-104. (in Persian)
- Bakam Nguenouho, O. S., Chevalier, A., Potelon, B., Benedicto, J., & Quendo, C. (2022). Dielectric characterization and modelling of aqueous solutions involving sodium chloride and sucrose and application to the design of a bi-parameter RF-sensor. *Scientific Reports*, 12(1), 7209.

- Cao, M., Zeng, S., Wang, J., & Guo, W. (2023). Dielectric properties of peaches with and without skin during storage and their relationship to internal quality. *Postharvest Biology and Technology*, 204, 112-433. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112433>.
- Chen, J. C., & Chou, C. C. (1993). *Cane sugar handbook: a manual for cane sugar manufacturers and their chemists*. New York: General and Introductory Food Science and Technology.
- De Whalley, H. C. S. (1964). *ICUMSA methods of sugar analysis: official and tentative methods recommended by the International Commission for Uniform Methods of sugar analysis (ICUMSA)*. Netherlands: Elsevier.
- El Khaled, D., Castellano, N. N., Gázquez, J. A., Perea-Moreno, A. J., & Manzano-Agugliaro, F. (2016). Dielectric spectroscopy in biomaterials. *Agrophysics. Materials*, 9(5), 310. <https://doi.org/10.3390/ma9050310>.
- Fazayeli, A., Kamgar, S., Nassiri, S. M., Fazayeli, H., & de la Guardia, M. (2019). Dielectric spectroscopy as a potential technique for prediction of kiwifruit quality indices during storage. *Information Processing in Agriculture*, 6(4), 479-486. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.02.002>.
- Ghatreh-Samani, N., Naderi-Boldaji, M., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Mehraban, H., & Bonyadian, M. (2017). Application of dielectric spectroscopy method with a parallel plate sensor to detect the freshness of milk. *New Technologies in the Food Industry (New Food Technologies)*, 15(4), 53-63. (in Persian)
- Guo, W., Fang, L., Liu, D., & Wang, Z. (2015). Determination of soluble solids content and firmness of pears during ripening by using dielectric spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture*, 117, 226-233. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.012>.
- Guo, W., Liu, Y., Zhu, X., & Wang, S. (2011). Dielectric properties of honey adulterated with sucrose syrup. *Journal of Food Engineering*, 107(1), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.06.013>.
- Haq, T., Ruan, C., Zhang, X., Ullah, S., Fahad, A. K., & He, W. (2020). Extremely sensitive microwave sensor for evaluation of dielectric characteristics of low-permittivity materials. *Sensors*, 20(7), 1916. <https://doi.org/10.3390/s20071916>.
- Hoog-Antonyuk, N. A. (2014). Stub resonators: Transmission-line-based water sensors. (Ph. D Thesis), University of Twente. <https://doi.org/10.3990/1.9789036537056>.
- Hoog-Antonyuk, 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(1), 90-96. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.01.012>.
- Keyvani, F., Naderi-Boldaji, M., Ghasemi-Varnamkhasti, M., & Izadi, Z. (2021). Feasibility study on detecting different types of sugar solutions using a dielectric resonator sensor. *Innovative Food Technologies (IFT)*, 8(4), 429-415. <https://doi.org/10.22104/JIFT.2021.4901.2043>. (in Persian)
- Khaled, D. E., Novas, N., Gazquez, J. A., Garcia, R. M., & Manzano-Agugliaro, F. (2015). Fruit and vegetable quality assessment via dielectric sensing. *Sensors, Agricultural and Food Biotechnology*. 15(7), 15363-15397. <https://doi.org/10.3390/s150715363>.
- Khalilian, H., Naderi-Boldaji, M., Ghasemi-Varnamkhasti, M., & Rostami, S. (2017). In-flow testing of a cylindrical dielectric sensor for measuring the sugar concentration of sugar beet syrup. *Innovative Food Technologies (IFT)*, 4(2), 131-140. <https://doi.org/10.22104/JIFT.2016.435>. (in Persian)
- McCrum, N. G., Read, B. E., & Williams, G. (1967). Anelastic and dielectric effects in polymeric solids. *Applied Polymer*, 13(2), 397. <https://doi.org/10.1002/app.1969.070130214>.
- Meade, G. P., & Chen, J. C. P. (1977). *Cane sugar handbook: a manual for cane sugar manufacturers and their chemists*. John Wiley and Sons.

- Mireei, S. 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: Physical*, 247, 289-297. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.06.012>.
- Naderi-Boldaji, M., Tohidi, M., & Ghasemi-Varnamkhasti, M. (2023). Evaluation of dielectric spectroscopy in fusion with Vis-SWNIR spectroscopy for measurement of sugar concentration on sugarcane stalk samples. In Press. (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. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.09.003>.
- Naderi-Boldaji, M., Mishra, P., Ahmadpour-Samani, M., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Ghanbarian, D., & Izadi, Z. (2018). Potential of two dielectric spectroscopy techniques and chemometric analyses for detection of adulteration in grape syrup. *Measurement*, 127, 518-524. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.06.015>.
- Pan, L., Zhu, Q., Lu, R., & McGrath, J. M. (2015). Determination of sucrose content in sugar beet by portable visible and near-infrared spectroscopy. *Food Chemistry*, 167, 264-271. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.06.117>.
- Phuphaphud, A., Saengprachatanarug, K., Posom, J., Maraphum, K., & Taira, E. (2020). Non-destructive and rapid measurement of sugar content in growing cane stalks for breeding programmes using visible-near infrared spectroscopy. *Biosystems Engineering*, 197, 76-90. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.06.012>.
- Shushtri, M., Ahmadiyya, S., & Isfia, Q. (2008). *Sugarcane in Iran*. Ayez Pub, Iran. (in Persian)
- Taira, E., Ueno, M., Saengprachatanarug, K., & Kawamitsu, Y. (2013). Direct sugar content analysis for whole stalk sugarcane using a portable near infrared instrument. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 21(4), 281-287.
- Teseme, W. B., & Weldelessie, H. W. (2020). Review on the study of dielectric properties of food materials. *American Journal of Engineering and Technology Management*, 5, 76-83. <https://doi.org/10.11648/J.AJETM.20200505.11>.
- Thomason, S. J., & Bialkowski, K. S. (2019). Dielectric spectroscopy based determination of sugar content in solution *Sensors Letters*, 3(5), 1-4. <https://doi.org/10.1109/LSSENS.2019.2910832>.
- Ungureanu, N., Vlăduț, V., & Biriș, S. Ș. (2022). Sustainable Valorization of Waste and By-Products from Sugarcane Processing. *Sustainability*, 14(17), 11089. <https://doi.org/10.3390/su141711089>.
- Uppal, S. K. (2003). Post harvest losses in sugarcane. *Sugar Technology*, 5(2), 93-94.
- Vaezi Zadeh, M., Shams, M., Afrooz, K., & Rostami, M. (2018). *The Dielectric Properties of Agri-food Materials measuring techniques. Proceedings of the Biosystem Mechanical Engineering and Mechanization of Iran*. Sep. 3-5. Hamedan Universit, Iran. (in Persian)
- Valantina, S. R. (2021). Measurement of dielectric constant: A recent trend in quality analysis of vegetable oil-A review. *Trends in Food Science & Technology*, 113, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.026>.
- Williams, P. C., & Norris, K. (2001). Variables affecting near-infrared spectroscopic analysis. *Near-infrared technology in the agricultural and food industries*, 2, 171-198. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.11.007>.
- Yousefi, B., Barzkar, M., Temar, M., Rakhshandero, M., & Mousavi Moghadam, L. (2016). Sugarcane cultivation. Tak Pub, Iran. (in Persian)

Research Paper

Feasibility Study of Measuring Sucrose Concentration in shredded Cane using Dielectric Spectroscopy Method

A. Farahmandi, M. Naderi-Boldaji*, M. Ajamian, 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: 6 February 2024, Accepted: 15 April 2024

<http://doi: 10.22092/amsr.2024.364936.1477>

Abstract

Sugarcane, an important crop in sugar production in the country, is widely produced in Khuzestan province. After harvesting the sugarcane and when delivered to the sugar factory, the cane is shredded. In this study, for measurement of sucrose concentration in shredded cane, the dielectric spectroscopy technique in the frequency range of 0-100 MHz was evaluated using a cylindrical parallel-plate sensor with compaction of the shredded cane. 55 samples of shredded cane were taken from the sugar production line of Salman Farsi factory during the harvesting season of 2021-2022 and their reference properties including sugar concentration with three indicators of Brix using refractometry method, Pol using simple polarimetry method and the sucrose measured using double polarimetry were measured. The samples were subjected to dielectric spectroscopy using the capacitance sensor and the dielectric spectra were analyzed for sugar concentration prediction. Multivariate regression analyses of partial least-squares regression (PLSR), principal component regression (PCR) and support vector regression (SVR) were applied for development of prediction models of sugar concentration variables. Validation of the prediction model of PLSR showed a stronger prediction of sucrose ($R^2= 0.79$, RMSE= 0.89, RPD= 2.22) measured using the double-polarimetry as compared to Pol ($R^2= 0.76$, RMSE= 0.8, RPD= 2.07) and Brix ($R^2= 0.77$, RMSE= 0.89, RPD= 2). This result was explained with higher number of OH groups of sucrose molecule as compared to the other sugars existing in the sugarcane juice and the dominant effect of sucrose on the dielectric characteristics of the juice. With optimization and improvement of the accuracy of this method, a simple and cost-effective instrument can be developed for use in sugar industries.

Keywords: Dielectric Sensor, Double Polarimetry, Sugar Concentration, Sugarcane



© 2023 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)