

Evaluation of dielectric spectroscopy in fusion with Vis-SWNIR spectroscopy for measurement of sugar concentration on sugarcane stalk samples

Mojtaba Naderi-Boldaji^{1*}, Mojtaba Tohid², Mahdi Ghasemi-Varnamkhasti¹

1- Associate Professors, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University, Shahrekord 88186-34141, Iran

2- Graduated PhD student, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University, Shahrekord 88186-34141, Iran

(*- Corresponding Author Email: naderi.boldaji@sku.ac.ir)

Corresponding Author ORCID ID: 0000-0002-2828-6798

Introduction

Development of rapid instruments for measuring the quality attributes of sugarcane such as sugar concentration and water content is one of the important needs in agricultural and industrial technology of sugarcane production and processing. Near infrared (NIR) spectroscopy has been one of the techniques widely applied for quality evaluation of sugarcane. However, NIR spectrophotometers in the full NIR wavelength range (up to 2500 nm) are expensive devices which are not readily available for portable applications. Short-wave NIR devices in the range of 1100 nm are available with lower costs but need to be evaluated for any specific application. On the other hand, dielectric spectroscopy has attracted the attention of researchers for quality evaluation of agricultural and food products. In a previous study, a parallel-plate capacitance sensor was developed and evaluated for non-destructive measurement of sugarcane Brix (total soluble solids) and Pol (sucrose concentration) as well as water content in the frequency range of 0-10 MHz. The results showed excellent prediction models with root mean square errors smaller than 0.3 for Brix and Pol. This study was aimed at development and evaluation of a dielectric sensor to be extendable for portable measurements on standing sugarcane stalk in comparison with short-wave NIR (SWNIR) spectroscopy to address how the fusion of the two methods may improve the accuracy of models for prediction of sugarcane Brix.

Materials and Methods

A dielectric sensor in the form of a gadget was developed with metallic electrodes to encompass the sugarcane stalk samples. The dielectric sensor was excited with sinusoidal voltage within 0-150 MHz frequency by a function generator and the conductive power through the electrodes was measured with a spectrum analyzer. 105 sugarcane stalk samples were prepared from seven sugarcane varieties and scanned by the dielectric sensor. The samples were also subjected to Vis-SWNIR radiation in the wavelength range of 400-1100 nm and the reflectance spectra were captured. Reference Brix and water content of the samples were determined using a portable refractometer and oven-drying method, respectively. Regression analyses

and artificial neural networks were performed on independent and combined data of dielectric and Vis-SWNIR spectroscopy to develop prediction models for Brix and water content.

Results and discussion

Partial least square regression on independent data sets of each instrument resulted in $RMSE_p= 1.14$ and $RMSE_p= 1.88$ for Brix using Vis-SWNIR and dielectric spectroscopy, respectively. Moreover, data fusion of dielectric and Vis-SWNIR spectroscopy in low level for prediction of Brix significantly improved the prediction accuracy to $R^2_p= 0.94$ and $RMSE_p= 0.74$. The medium level data fusion resulted in $R^2_p= 0.89$ and $RMSE_p= 0.93$ for prediction of water content.

Conclusion

In this study, Vis-SWNIR spectroscopy and dielectric spectroscopy methods were evaluated for measurement of sugarcane Brix and water content on stalk samples. To develop prediction models for Brix and water content, partial least squares (PLS) regression and artificial neural network (ANN) were compared. First, the prediction models were developed based on independent measurement of Vis-SWNIR and dielectric spectroscopy and then the fusion of the two techniques to improve the prediction accuracy was investigated. With fusion of the two methods at an intermediate level, the RMSE of Brix was obtained to be 0.74 which is a noticeable improvement as compared with the other studies. Based on the results achieved, development of a fusion probe of SWNIR and dielectric spectroscopy and measuring system could be the aim of future studies for in-situ evaluation of standing sugarcane quality parameters. Regarding the importance of measuring the quality properties of sugarcane during growth and maturity, the results of this study can have a significant role in development of a combined portable measurement system of NIR and dielectric spectroscopy methods for fast and non-destructive indication of sugarcane quality parameters.

Acknowledgement

This article was extracted from a research project financially supported by the research deputy of Shahrekord University. The Grant number was 0GRD34M1614. The authors would like to appreciate the support of the Amir-Kabir Sugarcane Agro-Industry Co., Khuzestan, Iran for providing the sugarcane stalk samples.

Keywords: Dielectric spectroscopy, Visible-Near infrared spectroscopy, Data fusion, Brix, Sugarcane

ارزیابی روش طیف‌سنجی دی‌الکترونیک در تلفیق با روش طیف‌سنجی Vis-SWNIR برای اندازه-

گیری غلظت قند روی نمونه ساقه نیشکر

مجتبی نادری بلداجی^{۱*}، مجتبی توحیدی^۲، مهدی قاسمی ورنامخواستی^۱

۱- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

۲- فارغ التحصیل دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد،

ایران

• ایمیل نویسنده مسئول: naderi.mojtaba@sku.ac.ir

• شناسه اراکید نویسنده مسئول: ۶۷۹۸-۲۸۲۸-۰۰۰۲-۰۰۰۰

چکیده

توسعه ابزارهای اندازه‌گیری سریع برای ارزیابی خصوصیات کیفی نیشکر شامل غلظت قند و محتوای رطوبت بدون نیاز به استخراج عصاره از ساقه از جمله ضرورت‌های فناوری در کشاورزی و صنعت این محصول می‌باشد. در این پژوهش، یک پراب دی‌الکترونیک با قابلیت توسعه و بکارگیری به شکل قابل حمل توسعه داده شد و عملکرد آن برای اندازه‌گیری غلظت قند (بر حسب درجه بریکس) و محتوای رطوبت روی نمونه‌های ساقه از هفت رقم نیشکر در بازه فرکانسی MHz ۱۵۰-۰ مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین بمنظور مقایسه و بهبود دقت اندازه‌گیری غلظت قند، توانایی روش طیف‌سنجی مرئی-فرو سرخ نزدیک موج کوتاه (Vis-SWNIR) در محدوده طول موج ۴۰۰-۱۱۰۰ نانومتر بررسی شد. از مدل‌های رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) برای پیش‌بینی درجه بریکس و محتوای رطوبت نمونه‌ها استفاده شد. علاوه بر ارزیابی مستقل عملکرد هر دو روش در بهترین حالت با $1/14$ $RMSE_p=$ و $1/88$ $RMSE_p=$ برای اندازه‌گیری بریکس به ترتیب با روش‌های طیف‌نگاری Vis-SWNIR و دی‌الکترونیک، روش‌های تلفیق داده (سطح پایین و سطح متوسط) برای استفاده از اثر هم‌افزایی اطلاعات بدست آمده از دو روش بکار گرفته شد. در پیش‌بینی بریکس، بهترین نتیجه مربوط به روش تلفیق داده سطح پایین با $0/94$ $R^2_p=$ و $0/74$ $RMSE_p=$ بود. همچنین روش تلفیق داده سطح متوسط با $0/89$ $R^2_p=$ و $0/93$ $RMSE_p=$ بهترین نتیجه را در پیش‌گویی مقادیر محتوای رطوبت داشت. بنابراین، رویکرد تلفیق داده به طور موثر دقت پیش‌بینی مدل‌های توصیف کننده را بهبود بخشید و می‌تواند به عنوان روش و ابزاری قابل اعتماد در اندازه‌گیری خصوصیات کیفی نیشکر مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: طیف‌سنجی دی‌الکترونیک، طیف‌سنجی مرئی-فرو سرخ نزدیک، تلفیق داده، درجه بریکس، نیشکر

مقدمه

شکر یکی از مهمترین مواد غذایی مورد نیاز انسان است که در بدن تولید انرژی و حرارت می‌کند. تقریباً ۶۰ درصد قند تولیدی دنیا از نیشکر و مابقی از چغندر قند تهیه می‌شود. در بین ۱۱۸ کشور تولید کننده 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. لذا وابستگی جهانی در حدود ۷۵٪ به نیشکر و ۲۵٪ به چغندر قند است. نیشکر با پتانسیل تولید تا ۱۲۰ تن نی در هکتار و بیش از ۶۰ میلیون کیلوکالری تولید انرژی در هکتار، بخش عمده‌ای از انرژی غذایی مردم جهان را تأمین می‌کند (FAO, 2021). اجزاء تشکیل دهنده عصاره خام نیشکر بسته به رقم و اقلیم متغیر است و عموماً شامل ۶۹-۷۵ درصد آب، ۱۶-۸ درصد ساکاروز، ۲-۵٪ درصد قندهای احیاء کننده، ۳-۵ درصد فیبر، ۱-۵٪ درصد ترکیبات غیرآلی، ۱-۵٪ درصد مواد نیتروژن دار و ۱-۵٪ درصد سایر مواد آلی است (Lal Mathur, 1990). این گیاه یکی از محصولات مهم زراعی کشور می‌باشد و در دهه اخیر به جایگاه مناسبی از نظر سطح زیر کشت و همچنین رشد عملکرد محصول دست یافته است، به گونه‌ای که در سال زراعی ۹۶-۹۷ سطح زیر کشت نیشکر در کشور ۸۸/۳ هزار هکتار و میانگین عملکرد آن به حدود ۵۸ تن در هکتار رسید (Anonymous, 2018). استان خوزستان با سهم تولید ۹۷ درصد از کل نیشکر کشور به عنوان قطب تولید نیشکر ایران شناخته شده است. وجود ۱۲ واحد کشت و صنعت نیشکر در این استان تولید سالانه ۶۵۰ هزار تن شکر را رقم زده است.

امروزه اندازه‌گیری و پایش کیفیت علاوه بر کمیت محصولات کشاورزی از جمله چالش‌های علمی و فنی کشاورزی بوده و بیش از پیش مورد توجه محققین واقع شده است. به طور کلی، بسیاری از فن‌آوری‌های رایج در تعیین خصوصیات کیفی محصولات از جمله نیشکر برای استفاده سریع مناسب نیستند، چرا که اجرای آن‌ها نیاز به افراد با مهارت بالا و تجهیزات گران‌قیمت دارند. همچنین روش‌های آزمایشگاهی وقت‌گیر بوده، اغلب وابسته به کاربر هستند و شامل استفاده از مواد شیمیایی خطرناک می‌شوند. مهم‌تر از همه اینکه نیازمند مکان ثابتی می‌باشند و تنها در آزمایشگاه قابلیت اجرا دارند (Mehrotra, & Siesler, 2003). به عنوان مثال، روش آزمایشگاهی پلاریمتری برای اندازه‌گیری غلظت قند در نیشکر یا چغندر قند نیاز به آماده‌سازی نمونه‌های عصاره قبل از اندازه‌گیری ساکاروز دارد و اغلب با سطوح بالایی از آلودگی با موادی مانند استات سرب همراه است (Magalhaes & Cerri, 2007). در همه روش‌های مزرعه‌ای (به جز برخی روش‌های غیرمخرب در حال پژوهش) که تا کنون برای عیارسنجی قند نیشکر بکار گرفته شده‌اند، ابتدا لازم است که ساقه نیشکر له شده و از عصاره آن برای تعیین عیار قند استفاده شود. از طرفی ارزش-گذاری اقتصادی نیشکر در ورودی کارخانه‌های قند بر اساس شاخص‌های کیفی نیشکر از جمله عیار (غلظت) قند صورت می‌گیرد که نیازمند توسعه ابزارهای اندازه‌گیری سریع با قابلیت اندازه‌گیری غیرمخرب بر روی ساقه بدین منظور است.

از جمله روش‌های غیرمخرب استفاده شده به منظور ارزیابی کیفیت محصولات کشاورزی می‌توان به روش‌های طیف‌سنجی دی‌الکترونیک، طیف-سنجی فروسرخ نزدیک، طیف‌سنجی رامان، ماشین بینایی و روش‌های صوتی و فراصوتی اشاره نمود که هر یک برای اندازه‌گیری پارامتر کیفی خاصی به کار گرفته شده‌اند (Xiaobo et al., 2007; Augusto & Filho, 2009; Nawi et al., 2012; Nawi et al., 2013; Naderi-Boldaji et al., 2015; Cole et al., 2016; Mireei et al., 2016; Sirisomboon, 2018; Pandiselvam et al., 2022). در میان روش‌های مذکور روش طیف‌سنجی مرئی-فروسرخ (Vis-NIR) به علت دقت بالا و امکان اندازه‌گیری همزمان خصوصیات کیفی ماده مورد توجه بیشتری قرار گرفته است (Sirisomboon, 2018; Pandiselvam et al., 2022). در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی با استفاده از این روش برای سنجش پارامترهای کیفی محصولات مختلف از جمله خرما (Mireei et al., 2010)، سیب (Bobelyn et al., 2010)، نیشکر (Nawi et al., 2012; Nawi et al., 2013; Chiattrakul et al., 2022)، پرتقال

(Magwaza et al., 2013)، لیموشیرین (Goodarzi et al., 2022)، چغندر قند (Pan et al., 2015; Bahrami et al., 2022; Gaci et al., 2022) و گلابی (Choi et al., 2017) انجام شده است. با اینحال به کارگیری این روش در محدوده کامل طیف فروسرخ نزدیک (تا ۲۵۰۰ نانومتر) به دلیل هزینه بالای دستگاه طیفسنج و عدم سهولت دسترسی به آن موجب محدودیت‌هایی شده که توجه محققین را برای ارزیابی توانایی محدوده مرئی- نزدیک فروسرخ موج کوتاه^۱ (Vis-SWNIR تا طول موج ۱۱۰۰ نانومتر) برای اندازه‌گیری خصوصیات کیفی مواد غذایی و کشاورزی به خود جلب نموده است چرا که طیفسنج‌های در این محدوده طیفی با قیمت نسبتاً ارزان در داخل کشور نیز تولید می‌شوند.

همچنین در مطالعات متعددی کارایی روش طیفسنجی دی‌الکتریک برای سنجش کیفیت مواد غذایی و کشاورزی از جمله عصاره انگور (Garcia et al., 2004)، خربزه (Guo et al., 2007)، کیفیت گوشت (Aldeza et al., 2010)، محتوای قند در عسل (Guo et al., 2010)، رسیدگی موز (Soltani et al., 2011)، نیشکر (Naderi-Boldaji et al., 2015)، کیفیت روغن زیتون (Sanaeifar et al., 2018) و کیوی (Fazayeli et al., 2019) بررسی شده است. روش دی‌الکتریک یک روش ساده و ارزان قیمت با قابلیت اندازه‌گیری به شکل غیرمخرب می‌باشد که امکان توسعه و بکارگیری آن نسبت به روش NIR بمراتب آسان‌تر است. طیفسنجی دی‌الکتریک بیانگر سنجش روند تغییرات مشخصه‌های دی-الکتریک ماده تابعی از فرکانس میدان الکتریکی حسگر است که به شکل طیف‌های دی‌الکتریک مورد تحلیل قرار می‌گیرد (Nelson, 2004; Skierucha et al., 2012; Blakey and Morales-Partera, 2016; Naderi-Boldaji et al., 2015). با استفاده از روش طیفسنجی دی‌الکتریک و بکارگیری یک حسگر خازنی صفحه موازی امکان اندازه‌گیری محتوای قند ساقه چهار رقم مختلف نیشکر را بررسی کردند. نتایج حاکی از دقت بسیار مطلوب این روش برای اندازه‌گیری درجه بریکس، درجه پل (ساکاروز) و محتوای رطوبت ساقه به شکل غیرمخرب بود. لذا توسعه یک پراب دی‌الکتریک با قابلیت توسعه و بکارگیری به شکل قابل حمل و امکان تغییر فاصله بین الکترودها جهت انطباق با ساقه ارقام مختلف نیشکر با قطرهای متفاوت و اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای مد نظر قرار گرفت.

تلفیق روش‌های اندازه‌گیری مختلف^۲ می‌تواند در افزایش دقت اندازه‌گیری مشخصه‌های کیفی محصولات کشاورزی تاثیر بسزایی داشته باشد. بطور کلی تلفیق داده‌های دو یا چند حسگر به خصوص زمانی که حسگرها اثرات متقابل متفاوتی با ماده ایجاد نمایند می‌تواند نسبت به حالت استفاده از یک حسگر، اطلاعات دقیق‌تری از ماده فراهم کرده و منجر به نتایج بهتری شود (Korel et al., 2001). تاکنون تحقیقی در زمینه‌ی استفاده تلفیقی از دو روش طیفسنجی دی‌الکتریک و طیفسنجی Vis-SWNIR برای اندازه‌گیری محتوای قند ساقه نیشکر بدون استخراج عصاره از ساقه گزارش نشده است. اندازه‌گیری با حسگر دی‌الکتریک بر پایه اثر متقابل یک میدان الکتریکی با ماده و با روش طیفسنجی فروسرخ بر پایه جذب انرژی از طیف الکترومغناطیس می‌باشد. لذا انتظار می‌رود تلفیق دو روش بتواند اطلاعات مکملی از دو اثر متقابل با ماده را در اندازه‌گیری دقیق‌تر مشخصات کیفی نیشکر ایجاد نماید. بنابراین اهداف این پژوهش عبارتند از: ۱- توسعه و ارزیابی یک حسگر دی‌الکتریک با قابلیت توسعه و بکارگیری برای اندازه‌گیری مزرعه‌ای ساقه نیشکر به شکل غیر مخرب، ۲- ارزیابی روش طیفسنجی Vis-SWNIR در اندازه‌گیری مشخصه‌های

۱- Visible-Short Wave Near-infrared

۲- Sensor fusion

کیفی ساقه نیشکر و ۳- ارزیابی تلفیق دو روش غیرمخرب طیف‌سنجی دی‌الکتریک و طیف‌سنجی Vis/WSIR در بهبود دقت اندازه‌گیری غلظت قند و محتوای رطوبت ساقه.

مواد و روش‌ها

تهیه نمونه‌ها

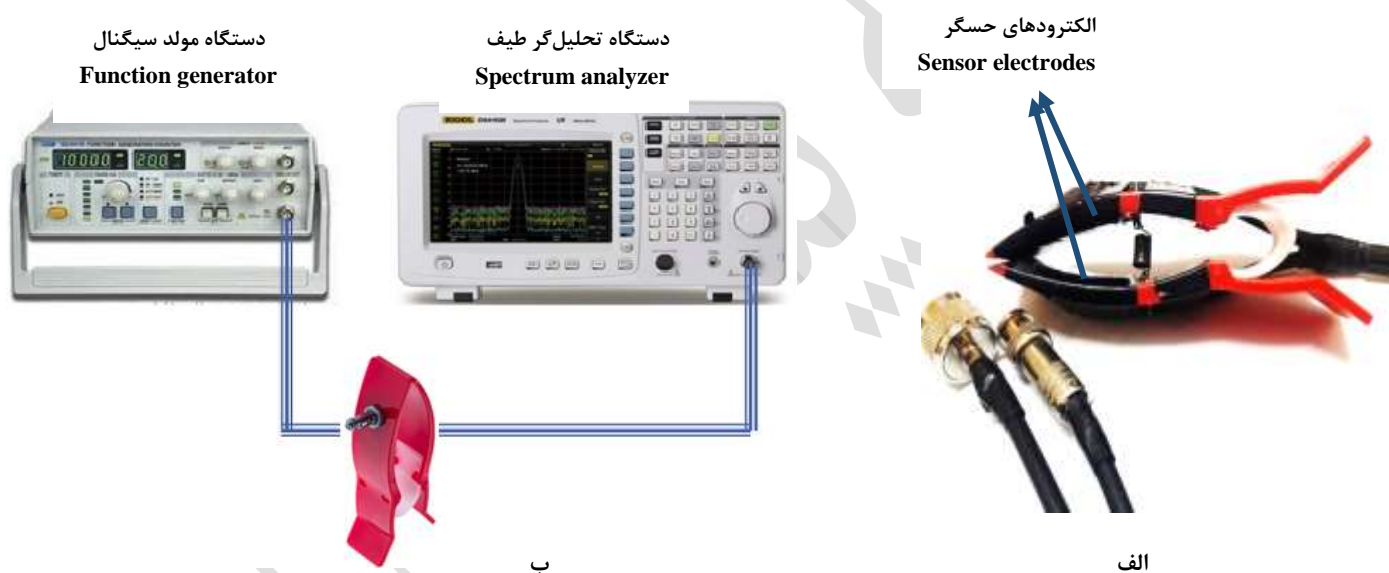
در این مطالعه، نمونه‌های نیشکر رسیده در اواخر فصل پاییز از مزارع نیشکر واحد کشت و صنعت امیرکبیر استان خوزستان تهیه شد. نمونه‌ها از هفت رقم تجاری CP-48، CP-57، CP-69، CP-70، CP-73، IRC-9902 و IRC-9903 انتخاب شدند. به منظور پوشش گستره‌ای از تغییرات غلظت قند، نمونه‌ها به صورت تصادفی از نقاط مختلف چند مزرعه تهیه و در کوتاه‌ترین زمان ممکن به محل اندازه‌گیری در دانشگاه شهرکرد منتقل شدند. نمونه‌ها تا زمان اندازه‌گیری برای جلوگیری از فساد و از دست دادن رطوبت در یخچال با دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شدند. پیش از شروع اندازه‌گیری برای هر رقم، به منظور برقراری شرایط تعادل دمایی، نمونه‌ها به مدت ۱۲ ساعت در محل آزمایش نگهداری شد تا به دمای محیط برسند. برای انجام آزمایش‌ها از قسمت میانی بین گره‌های روی ساقه، تعداد ۱۰۵ نمونه ۱۰ سانتی‌متری از ارقام مختلف تهیه شد. هر نمونه به دو قطعه ۵ سانتی‌متری جفت شده بریده شد که نیمی از آن برای اندازه‌گیری با حسگرها و سپس خشکاندن در آن برای اندازه‌گیری محتوای رطوبت و نیم جفت شده برای اندازه‌گیری مرجع غلظت قند مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به تغییرات شدید غلظت قند در امتداد طول ساقه نیشکر، به منظور افزایش گستره تغییرات محتوای قند، نمونه‌ها از قسمت‌های مختلف سر، وسط و پایین ساقه تهیه شدند. قطر نمونه‌ها توسط کولیس با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر و جرم مرطوب آن‌ها توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری و ثبت گردید.

طیف‌سنجی دی‌الکتریک

به منظور اندازه‌گیری‌های دی‌الکتریک، پرابی به شکل یک انبر ساخته شد (شکل ۱-الف). این حسگر جهت امکان اندازه‌گیری سریع بر روی ساقه متشکل از دو الکتروود نصب شده در دهانه انبر می‌باشد. الکترودهای خازن از ورق آلومینیوم مستطیل شکل با ابعاد ۱/۵×۲ سانتی‌متر در مقابل هم نصب شدند. فاصله دهانه انبر قابل تغییر و به شکل فتری برگشت‌پذیر می‌باشد به نحوی که می‌توان اندازه‌گیری بر روی ساقه‌ها با ضخامت‌های مختلف را اجرا نمود. الکترودهای خازن از طریق کابل کوکاسیال با امپدانس مشخصه 50Ω از یک طرف به دستگاه مولد سیگنال (Ag-4151, Owon, Hong Kong) با دامنه فرکانسی ۱۵۰-۰ مگاهرتز و از طرف دیگر به دستگاه تحلیل‌گر طیف (GSP-827, GW Instek, Taiwan) متصل شد. شکل ۱-ب اجزا و نحوه اتصال در سامانه اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. روش اندازه‌گیری مورد استفاده در این پژوهش طیف‌سنجی توان دی‌الکتریک نام گذاری شد که اساساً هدایت خازنی جریان الکتریکی از طریق ماده دی‌الکتریک را اندازه‌گیری می‌کند که تحت تاثیر تغییرات موجود در مشخصه‌های دی‌الکتریک ماده قرار می‌گیرد (Naderi-Boldaji et al., 2015). مشخصات دی‌الکتریک یک ماده شامل ضریب دی‌الکتریک (ϵ') و فاکتور افت (ϵ'') می‌باشد که ضریب دی‌الکتریک بیانگر جذب انرژی میدان الکتریکی خارجی توسط دو قطبی‌های موجود در ماده با مکانیزم

پلاریزاسیون و فاکتور افت بیانگر میزان تبدیل انرژی الکتریکی به حرارت در ماده می‌باشد. اندازه‌گیری مستقل مشخصه‌های دی‌الکتریک ماده نیازمند دستگاه‌های تحلیل گر برداری شبکه یا تحلیل گر امپدانس می‌باشد که دستگاه‌های بسیار گران قیمت بوده و به سادگی در دسترس نمی‌باشند. لذا روش مورد استفاده در این مطالعه اثر خصوصیات دی‌الکتریک را با پارامتر توان دی‌الکتریک تابعی از فرکانس تغذیه به شکل طیف‌های توان در اختیار قرار می‌دهد. توانایی این روش در مطالعات متعدد قبلی مورد ارزیابی و تایید قرار گرفته است (Hoog *et al.*, 2012; Ghasemi-*et al.*, 2018; Varnamkhasti *et al.*, 2017; Mireei *et al.*, 2017; Naderi-Boldaji *et al.*, 2018).

برای اندازه‌گیری نمونه‌ها، توان دی‌الکتریک در محدوده فرکانس بین ۱۵۰-۰ MHz اندازه‌گیری و با استفاده از نرم افزار الحاقی دستگاه تحلیل-گر طیف ثبت شد. با توجه به عدم امکان جاروب فرکانس به شکل پیوسته، فرکانس‌ها به شکل دستی در ۸۹ فرکانس (با فاصله ۰/۵ MHz در محدوده ۱۰-۰ MHz و با فاصله ۲ بین ۱۵۰-۱۰ MHz) تنظیم شد و اندازه‌گیری توان در هر فرکانس جداگانه انجام شد.



شکل ۱- الف) حسگر دی‌الکتریک و ب) سامانه اندازه‌گیری دی‌الکتریک و اجزاء آن

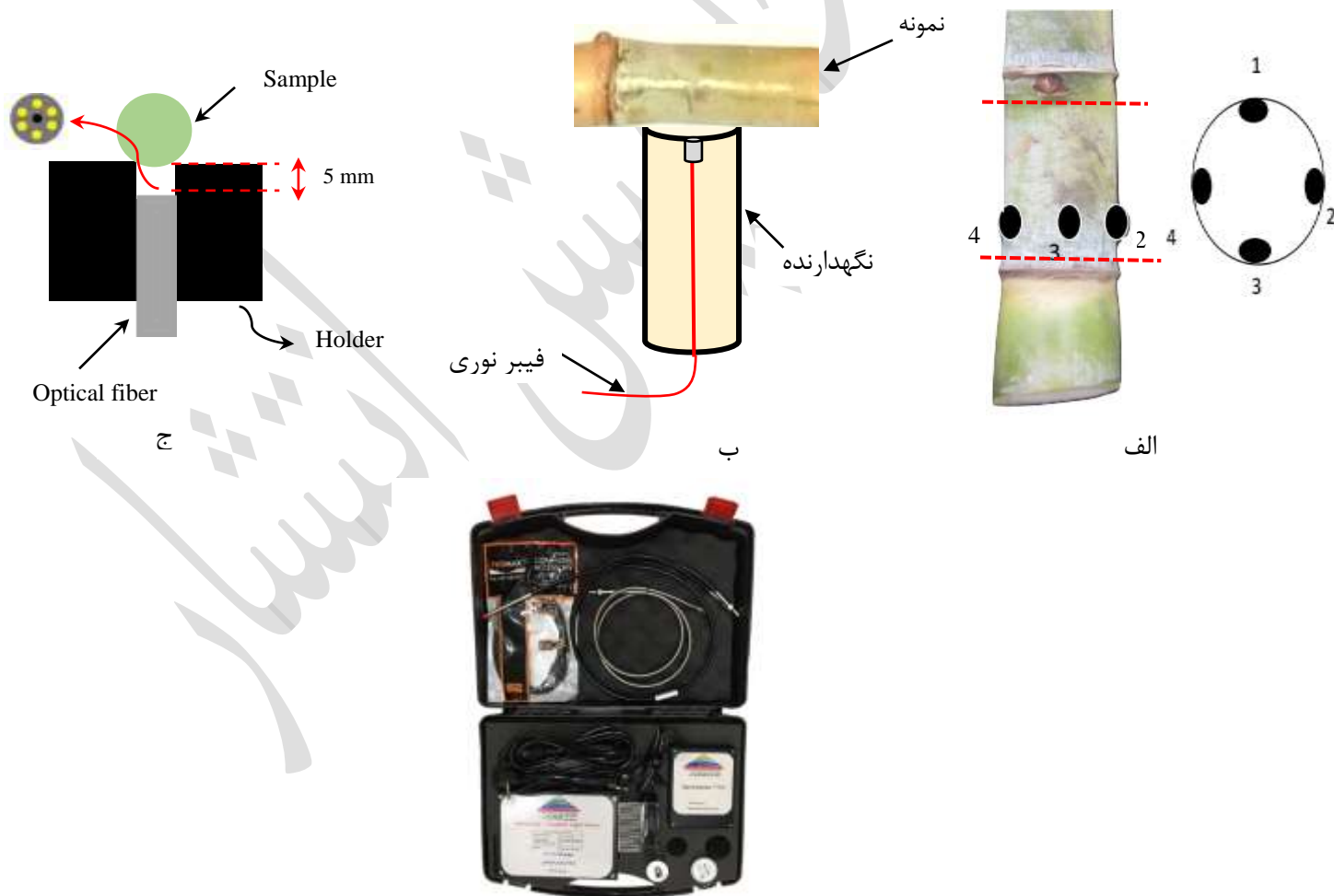
Fig. 1. A) The dielectric sensor, and b) the dielectric measuring system and its components

طیف‌سنجی مرئی - فروسرخ نزدیک موج کوتاه (Vis-SWNIR)

جمع‌آوری طیف‌های Vis-SWNIR از نمونه‌ها به روش بازتابی پراکنشی^۱ و با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر (مدل NIR-V900) ساخت شرکت فناوریان فیزیک نور ایران انجام شد. این طیف‌سنج داری آشکارساز^۱ CCD، محدوده طیفی ۴۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر و قابلیت تفکیک طول موج

۱- Diffuse reflectance

۲ نانومتر است. همچنین این دستگاه مجهز به یک کاوشگر فیبر نوری شامل ۶ فیبر نوری ۲۰۰ میکرونی مجهز به درگاه خروجی SMA است به طوری که ۵ فیبر وظیفه انتقال نور از منبع نوری هالوژن به نمونه و یک فیبر وظیفه هدایت پرتوی برآمده از نمونه به دستگاه اسپکتروفوتومتر را انجام می‌دهد. نهایتاً طیف به دست آمده از طریق درگاه USB به رایانه منتقل و ذخیره می‌شود. برای اندازه‌گیری نمونه‌های ساقه نیشکر، یک پایه تفلونی دارای سوراخی به قطر ۵ میلی‌متر در مرکز جهت عبور فیبر نوری ساخته شد (شکل ۲-ب). فاصله فیبر نوری از سطح پایه نگهدارنده نمونه در تمامی اندازه‌گیری‌ها ثابت (۵ میلی‌متر) بود به صورتی که فیبر با نمونه تماس مستقیم نداشت. با تنظیمات موجود در نرم افزار دستگاه و اخذ طیف نور سفید از سطح سفید مرجع، دستگاه در حالت بازتابی تنظیم شد و طیف‌های بازتابی بر حسب درصد بازتاب ثبت شد. بر این اساس، از هر نمونه ساقه نیشکر ۴ طیف (از چهار نقطه محیطی، شکل ۲-الف) و با ۵ روبش متوالی (در هر نقطه) برداشت شد و میانگین آنها به عنوان طیف اندازه‌گیری شده در نظر گرفته شد (شکل ۲).



شکل ۲- الف) نقاط اندازه‌گیری روی ساقه و ب) طرح واره‌ی روش اندازه‌گیری طیف‌های VIS/NIR، ج) موقعیت فیبر نوری نسبت به نمونه‌ها و د) دستگاه طیف سنج مورد استفاده

Fig. 2. a) The scanning points on the sugarcane stalk, b) schematics of Vis-NIR measurement setup and c) the position of optical fiber with respect to sample

اندازه‌گیری‌های مرجع

درجه بریکس معیاری جهت تعیین میزان مواد جامد محلول است که به طور استاندارد با روش شکست نور اندازه‌گیری می‌شود. در عصاره نیشکر این معیار بعنوان یکی از شاخص‌های عیار قند اندازه‌گیری و مقایسه می‌شود. برای اندازه‌گیری درجه بریکس، ابتدا عصاره هر نمونه ساقه نیشکر با فشار مکانیکی استخراج شد و سپس با استفاده از یک دستگاه رفرکتومتر دیجیتال رومیزی (Milwaukee MA871, Hungary) با دقت $g/100\text{ ml}$ 0.2 ، درجه بریکس نمونه‌ها با سه تکرار اندازه‌گیری و ثبت شد. برای تعیین محتوای رطوبت نمونه‌های ساقه نیشکر از روش خشک کردن با روش استاندارد (USDA, 1970) استفاده شد. ابتدا وزن تر نمونه‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دستگاه آون با دمای 105 درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و وزن نمونه‌های خشک‌شده اندازه‌گیری شد. در نهایت محتوای رطوبت نمونه‌ها با استفاده از وزن تر و خشک محاسبه شد.

تحلیل داده‌ها

پیش‌پردازش داده‌ها

داده‌های خام طیف‌سنج Vis-SWNIR معمولاً شامل اطلاعات غیر مفیدی است که در اثر عواملی مانند اثر پراکنش نور، ناهموازی‌های سطحی نمونه، تغییر در اندازه نمونه، نویز حرارتی آشکارساز طیف‌سنج ایجاد می‌شود. اطلاعات غیر مفید ممکن است تاثیر نامطلوب در نتایج حاصل از پردازش اطلاعات بگذارد. بنابراین به منظور حذف این اطلاعات باید قبل از تدوین مدل‌های کالیبراسیون، عملیات پیش‌پردازش بر روی داده‌ها انجام شود. برای پیش‌پردازش داده‌ها معمولاً از روش‌های مختلف هموارسازی^۱، نرمال‌سازی^۲ و افزایش قدرت تفکیک طیف^۳ استفاده می‌شود (Heise & Winzen, 2006). در این پژوهش از روش‌های میانگین متحرک (MA)^۴، ساویتسکی-گولای (SG)^۵، تصحیح خط پایه (BC)^۶، تصحیح پراکنش افزاینده (MSC)^۷، متغیر نرمال استاندارد (SNV)^۸، مشتق اول (D1) و ترکیبی از این روش‌ها استفاده شد. MA و SG از روش‌های هموارسازی هستند که به منظور حذف نویزهای تصادفی استفاده می‌شوند. BC، MSC و SNV از روش‌های نرمال‌سازی هستند که برای تصحیح اثرات جمعی

۱ - Smoothing

۲ - Normalizing

۳ - Spectral Resolution

۴- Moving Average

۵- Savitzky-Golay

۶- Baseline Correction

۷- Multiplicative Scatter Correction

۸- Standard Normal Variate

و افزایش انحراف ناشی از عوامل فیزیکی مانند اندازه نمونه، پراکنش غیر یکنواخت در طیف و ضریب شکست نور کاربرد دارند. از مشتق اول نیز برای افزایش قدرت تفکیکی طیفها استفاده می‌شود که به این منظور ابتدا باید طیفها هموار شوند. در این پژوهش از روش SG قبل از مشتق‌گیری استفاده شد (Jamshidi et al., 2014; Fu et al., 2007).

تحلیل رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS)^۱

روش PLS یک مدل‌سازی خطی است که برای ساده‌سازی روابط میان متغیرهای مستقل (در اینجا داده‌های طیف‌های Vis/SWIR و دی-الکترونیک) و متغیرهای وابسته (در اینجا بریکس و محتوای رطوبت)، مقادیر متغیرهای مستقل را به تعداد کمی از متغیرهای پنهانی (LV^۲) تصویر می‌کند. در واقع در این روش مولفه‌های جدیدی که ترکیب خطی از متغیرهای اولیه هستند ایجاد شده، سپس از این مولفه‌ها برای ساختن مدل رگرسیونی استفاده می‌شود.

شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)^۳

شبکه‌های عصبی مصنوعی مدل‌های ریاضی و انعطاف‌پذیری هستند که می‌توانند در مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده و غیرخطی بکار برده شوند. این شبکه‌ها قادرند با انتخاب مناسب تعداد لایه‌ها و نرون‌ها، یک نگاشت غیرخطی بین ورودی‌ها و خروجی‌ها ارائه دهند. لایه یا لایه‌های مخفی، اطلاعات کسب شده از لایه ورودی را پردازش کرده و در اختیار لایه خروجی می‌دهد. در این تحقیق از دو نوع شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (MLP) و شبکه آشاری پس انتشار پیشرو (CFBP)^۴ استفاده شد. شبکه عصبی CFBP نیز مانند MLP از الگوریتم پس انتشار خطا برای اصلاح وزن‌ها استفاده می‌کند ولی خصوصیت اصلی شبکه مذکور این است که نرون‌های هر لایه به همه نرون‌های لایه‌های قبل متصل است. برای آموزش و به‌هنگام‌سازی وزن‌های شبکه‌های مورد استفاده از روش‌های آموزش گرادینان نزولی (GD) و لوبنرگ-مارکواریت (LM) استفاده شد. بهترین تابع فعال‌سازی، الگوریتم آموزشی و تعداد نرون به صورت سعی و خطا تعیین گردید.

روش‌های تلفیق داده^۵ (Data Fusion)

تکنیک‌های تلفیق داده، ابزاری مهم است که می‌تواند عملکرد یک سیستم تشخیصی که از چندین حسگر مختلف تشکیل شده است را بهبود بخشد. در واقع در تلفیق داده، اطلاعات مربوط به پایگاه‌های داده چند حسگر (منابع مختلف اطلاعاتی) با یکدیگر تلفیق شده و نتایج بر اساس داده‌های جدید استخراج می‌شود (Luzuriaga, 1999). به طور کلی روش‌های تلفیق داده را می‌توان در سه سطح طبقه‌بندی کرد، تلفیق سطح پایین

۱-Partial Least Squares

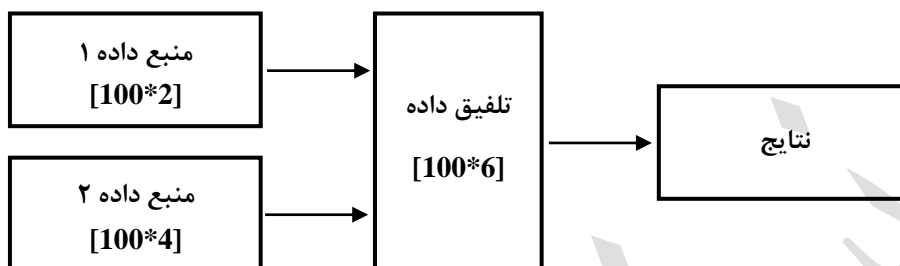
۲- Latent variable

۳-Artificial Neural Network

۴-cascade forward back propagation

۵- Data Fusion

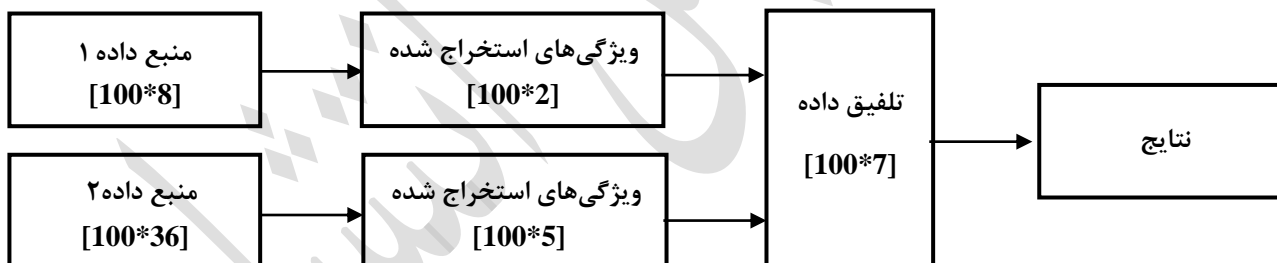
(LLF)^۱، سطح متوسط (ILF)^۲ و سطح بالا (HLF)^۳ (Korel, 2001). در تلفیق سطح پایین داده‌های همه منابع اطلاعاتی به سادگی پیش از ساخت مدل به هم اضافه می‌شوند (Castanedo, 2013; Rudnitskaya et al., 2006). بنابراین در ماتریس داده ایجاد شده با این روش، تعداد ردیف‌ها برابر با تعداد نمونه‌ها و تعداد ستون‌ها برابر با تعداد سیگنال‌های کلیه منابع است (شکل ۳).



شکل ۳ - طرحواره بلوکی روش تلفیق داده سطح پایین (LLF)

Fig. 3. Block diagram of a low level data fusion model

در تلفیق داده سطح متوسط (ILF) که به عنوان تلفیق داده سطح ویژگی نیز معروف است، ابتدا برای هر منبع داده، استخراج ویژگی انجام می‌شود و سپس ترکیب ویژگی‌های استخراج شده در توسعه مدل استفاده می‌شود (شکل ۴). این روش با توجه به عملکرد مناسب و سازگاری کافی با روش-



های استخراج ویژگی، محبوبیت زیادی دارد (Borras et al., 2015).

شکل ۴ - طرحواره بلوکی روش تلفیق داده سطح متوسط (ILF)

Fig. 4. Block diagram of an intermediate fusion model

۱- Low-Level fusion

۲- Intermediate-Level Fusion

۳- High-Level Fusion

در تلفیق داده سطح بالا (HLF) داده‌های هر منبع تجزیه و تحلیل شده و پس از آن یک مدل برای هر منبع داده به طور جداگانه ساخته می‌شود. سپس نتایج حاصل از همه مدل‌ها ادغام می‌شوند (Biancolillo *et al.*, 2014).

ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی

در این پژوهش برای تدوین مدل‌های پیش‌بینی، ابتدا نمونه‌ها به دو دسته کالیبراسیون و پیش‌بینی به ترتیب شامل ۷۵٪ و ۲۵٪ داده‌ها تقسیم شدند. پس از آموزش مدل کالیبراسیون، از اعتبار سنجی متقاطع کامل^۱ برای ارزیابی درونی مدل‌ها استفاده شد. این روش اعتبارسنجی، زمانی که تعداد نمونه‌ها کم یا متوسط است، مناسب‌ترین روش اعتبارسنجی مدل است (Jamshidi *et al.*, 2012). در این روش پس از خارج کردن یک نمونه، مدل برای n-1 نمونه باقیمانده آموزش دیده و برای پیش‌بینی نمونه کنار گذاشته شده اعتبارسنجی می‌شود. با تکرار این الگوریتم برای تمامی نمونه‌ها اعتبارسنجی مدل کامل می‌شود. همچنین از دسته داده پیش‌بینی (۲۵٪ از کل داده‌ها) برای اعتبارسنجی نهایی مدل با نمونه‌هایی که قبلاً در آموزش مدل بکارگرفته نشده استفاده شد. از پارامترهای آماری ریشه میانگین مربعات خطای کالیبراسیون ($RMSE_C$)، ریشه میانگین مربعات خطای اعتبارسنجی متقاطع یگانه ($RMSE_{CV}$)، ریشه میانگین مربعات خطای پیش‌گویی ($RMSE_P$) و همچنین ضریب تبیین کالیبراسیون (R^2_C)، ضریب تبیین اعتبارسنجی متقاطع یگانه (R^2_{CV}) و ضریب تبیین پیش‌گویی (R^2_P) برای مقایسه و اعتبارسنجی مدل‌ها استفاده شد. تحلیل‌های آماری این پژوهش با استفاده از نرم افزارهای SPSS v13، MATLAB 8.3 (R2014a) و Unscrambler x10.4 انجام شد.

نتایج و بحث

مشخصات نمونه‌ها و طیف‌های برداشت شده

جدول ۱ خلاصه‌ای از آمار توصیفی داده‌های کالیبراسیون و آزمون نمونه‌های نیشکر را نشان می‌دهد. مقادیر شاخص بریکس و محتوای رطوبتی به ترتیب در محدوده ۱۲/۵-۲۲/۷ و ۸۰/۸-۶۵ برای دسته کالیبراسیون و ۱۴/۳-۲۲/۴ و ۶۹/۸-۸۱٪ برای دسته آزمون می‌باشند که بیانگر تنوع و دامنه تغییرات گسترده در نمونه‌ها می‌باشد. همچنین نزدیکی محدوده‌های بریکس، محتوای رطوبتی و قطر نمونه‌ها در دسته‌های کالیبراسیون و آزمون، قابل اعتماد بودن طبقه‌بندی تصادفی داده‌ها برای تحلیل را نشان می‌دهد.

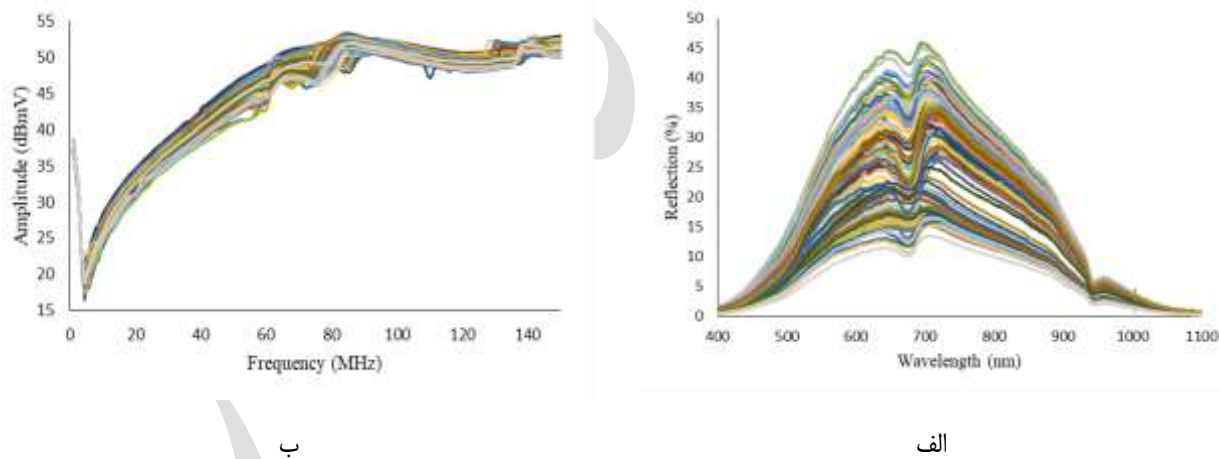
^۱ - Leave One-out Cross Validation

جدول ۱- آمار توصیفی نمونه‌های نیشکر

Table 1. Descriptive statistics of sugarcane stalk samples

مجموعه نمونه‌ها Sample sets	نمونه‌های کالیبراسیون (۷۹ نمونه)				نمونه‌های آزمون (۲۸ نمونه)			
	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف استاندارد	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف استاندارد
متغیر Variable	Min	Max	Mean	Standard deviation	Min	Max	Mean	Standard deviation
بریکس (g/ 100 ml) Brix (g/100 ml)	12.5	22.7	18.2	2.36	14.3	22.4	18.3	2.37
محتوای رطوبتی (%) Moisture content (%)	65	80.8	74.1	2.87	69.8	81	73.8	3.11
قطر (mm) Diameter (mm)	16.6	30.8	22.3	2.91	16.9	28.7	22.1	2.87

شکل ۵ طیف‌های حاصل از دو روش Vis-SWNIR و دی‌الکتریک را برای تمامی نمونه‌ها نشان می‌دهد. در طیف‌های Vis-SWNIR با افزایش رطوبت میزان بازتاب بواسطه افزایش جذب کاهش یافته است چرا که مولکول آب در باند طیفی مورد مطالعه بخصوص در طول موج‌های بزرگتر از ۶۰۰ نانومتر جذب قابل توجهی دارد (Langford et al., 2001). در طیف‌های دی‌الکتریک نیز روند موجود افزایش دامنه طیف‌ها با افزایش میزان رطوبت را نشان می‌دهد. افزایش میزان رطوبت در ساقه باعث افزایش ضریب دی‌الکتریک نمونه و متعاقباً افزایش توان دی‌الکتریک حسگر می‌شود (Skierucha et al., 2012; Naderi-Boldaji et al., 2015).



شکل ۵- الف) طیف‌های بازتابی Vis-SWNIR و ب) طیف‌های دی‌الکتریک نمونه‌های نیشکر

Fig. 5. a) The reflection Vis-SWNIR spectra and b) the dielectric spectra of the sugarcane samples

نتایج پیش‌بینی روش طیف‌سنجی Vis-SWNIR

نتایج کالیبراسیون و اعتبارسنجی درونی مدل‌های رگرسیونی PLS برای درجه بریکس و محتوای رطوبت با داده‌های طیفی Vis-SWNIR در جدول ۲ نشان داده شده است. مدل‌ها هم بر اساس طیف‌های خام و هم با استفاده از روش‌های پیش‌پردازش مختلف بررسی شدند. مقایسه نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مدل‌سازی شاخص بریکس با استفاده از پیش‌پردازش MSC بهترین نتیجه را به همراه داشته است ($R^2_{CV} = 0/77$ ، $RMSE_{CV} = 1/136$). برای مدل‌سازی محتوای رطوبت، بهترین نتیجه در حالت استفاده از پیش‌پردازش SNV ($R^2_{CV} = 0/73$ ، $RMSE_{CV} = 1/15$) به دست آمد. همچنین در تدوین مدل‌ها به منظور جلوگیری از بیش یا کم برازش شدن مدل، انتخاب بهترین تعداد متغیر پنهانی (LV) بر اساس انتخاب نقطه کمینه در نمودار واریانس مقادیر باقیمانده در برابر تعداد متغیرهای پنهانی تعیین شد (Jamshidi *et al.*, 2012). به منظور صحت‌سنجی مدل‌های حاصل، بهترین مدل‌ها با ۲۵٪ از داده‌ها (داده‌های مشاهده نشده توسط مدل) مورد آزمون قرار گرفتند که نتایج آن در جدول ۳ گزارش شده است. همچنین شکل ۶ مقادیر پیش‌بینی شده مقدار رطوبت و بریکس مدل‌های PLS منتخب در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده آنها نشان می‌دهد. بر این اساس خطای پیش‌بینی بریکس و محتوای رطوبت به ترتیب ۱/۱۲٪ و ۱/۴۹٪ حاصل شد که حاکی از دقت خوب روش طیف‌سنجی Vis-SWNIR در اندازه‌گیری مشخصه‌های کیفی نیشکر می‌باشد.

این نتایج در مقایسه با برخی مطالعات دیگر با روش اندازه‌گیری مشابه در محصولات مختلف امیدوار کننده است. ناوی و همکاران (Nawi *et al.*, 2013) با مدل‌سازی PLS داده‌های حاصل از دو روش طیف‌سنجی جذبی و بازتابی در محدوده طیفی Vis-SWNIR به پیش‌بینی بریکس سه رقم مختلف نیشکر پرداختند و با R^2 و $RMSE_P$ به ترتیب ۰/۸۹ و ۱/۵۱ برای طیف جذبی و ۰/۹۱ و ۱/۴۱ برای طیف بازتابی مقادیر بریکس را پیش‌بینی نمودند. باقرپور و همکاران (Bagherpour *et al.*, 2015) در پژوهشی با استفاده از تکنیک NIR به بررسی میزان قند موجود در ریشه‌های چقدر قند پرداختند. نتایج تحلیل PLS برای تخمین بریکس، بیانگر R و $RMSE_P$ به ترتیب ۰/۹۵ و ۱/۷ بود. Mumkesh *et al.* (2017) در اندازه‌گیری بریکس و محتوای رطوبت لیمو شیرین با روش یکسان به ترتیب مقادیر خطای ۰/۵ و ۰/۵۷ را گزارش نمودند. Peris *et al.* (2001) مقدار بریکس واریته‌های مختلف سیب را با استفاده از روش طیف‌سنجی فرورسرخ نزدیک مورد بررسی قرار دادند. مدل‌های PLS تدوین شده مقادیر بریکس را با R^2 در محدوده ۰/۷۳ – ۰/۸۹ و خطای حدود ۰/۷ درجه بریکس پیش‌بینی نمودند.

جدول ۲- نتایج کالیبراسیون و اعتبارسنجی درونی مدل رگرسیونی PLS برای پیش‌بینی بریکس و محتوای رطوبت نیشکر با داده‌های طیفی

Vis-SWNIR

Table 2. The results of PLS regression models for prediction of Brix and moisture content of sugarcane from spectral data of Vis-SWNIR

بریکس Brix		محتوای رطوبت Moisture content	
کالیبراسیون Calibration	اعتبارسنجی متقاطع یگانه	کالیبراسیون Calibration	اعتبارسنجی متقاطع یگانه

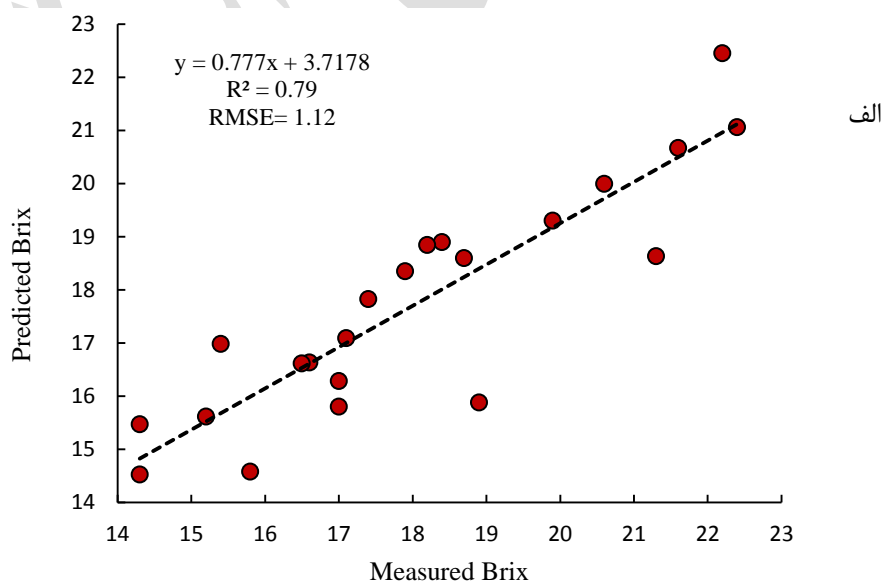
پیش پردازش Pre-processing	Leave-one-out cross validation				Leave-one-out cross validation			
	R^2_c	RMSECV	R^2_{cv}	RMSECV	R^2_c	RMSECV	R^2_{cv}	RMSECV
Raw	0.91	0.677	0.75	1.173	0.94	0.675	0.70	1.575
BC	0.95	0.52	0.75	1.191	0.92	0.795	0.67	1.645
MA	0.91	0.693	0.73	1.228	0.89	0.942	0.67	1.643
MSC	0.97	0.381	0.77	1.136	0.96	0.579	0.71	1.568
SNV	0.96	0.579	0.71	1.568	0.97	0.457	0.73	1.500
SG	0.91	0.691	0.74	1.214	0.91	0.833	0.69	1.606
D1	0.94	0.731	0.73	1.231	0.94	0.693	0.69	1.607
MSC+SG+D1	0.96	0.459	0.74	1.196	0.92	0.812	0.68	1.628

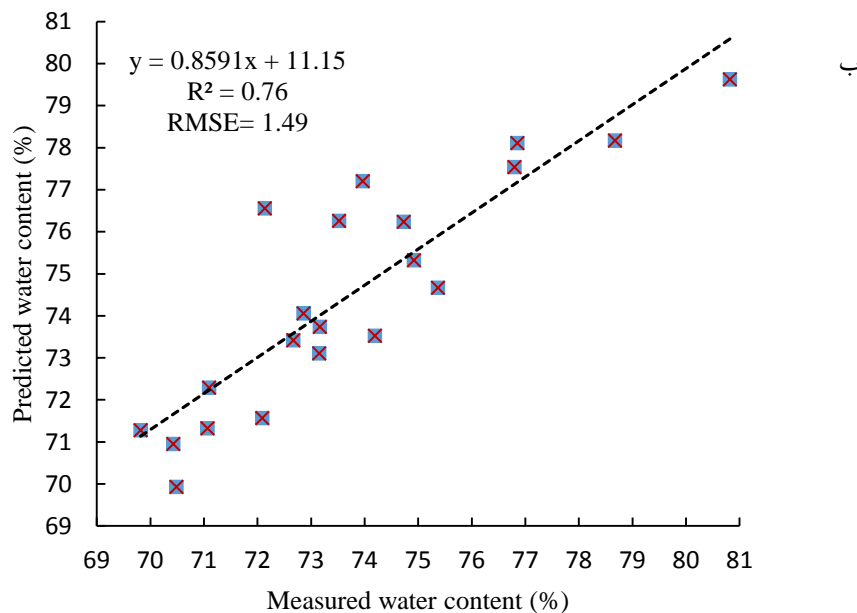
جدول ۳- نتایج اعتبارسنجی بهترین مدل‌های PLS در پیش‌بینی مقدار بریکس و محتوای رطوبتی با داده‌های طیفی Vis-SWNIR

Table 3. The results of validation for the best PLS prediction model of Brix and moisture content from spectral data of

Vis-SWNIR

متغیر Variable	پیش پردازش Pre-processing	R^2_p	RMSEP	LV
بریکس (g/ 100 ml) Brix (g/ 100 ml)	MSC	0.79	1.12	11
محتوای رطوبتی (%) Moisture content (%)	SNV	0.76	1.49	12





شکل ۶- نتایج اعتبارسنجی مدل‌های PLS برای الف) مقدار بریکس و ب) محتوای رطوبتی

Fig. 7. The results of validation for PLS models of a) Brix, and b) moisture content

جدول ۴ نتایج ارزیابی دو نوع شبکه عصبی مصنوعی MLP و CFBP به منظور پیشگویی درصد محتوای رطوبت و بریکس نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در پیش‌بینی بریکس، شبکه عصبی CFBP با ۲۰ نرون در لایه‌های مخفی کمترین مقدار خطا (۱/۳۸) و بالاترین ضریب تبیین (۰/۷۱) را به دست داد. همچنین شبکه عصبی MLP با ۱۷ نرون در لایه مخفی به عنوان بهترین شبکه در پیش‌بینی محتوای رطوبت با خطای ۱/۵۶ انتخاب شد. نتایج نشان می‌دهد که شبکه عصبی نتوانسته نتایج بهتری در مقایسه با روش رگرسیون PLS ارائه دهد.

جدول ۴- نتایج اعتبارسنجی بهترین شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی بریکس و محتوای رطوبتی با استفاده از داده‌های طیف‌سنجی Vis-

SWNIR

Table 4. The validation results of the best neural networks in prediction of Brix and water content from Vis-NIR spectral data

متغیر Variable	نوع شبکه Network type	الگوریتم آموزش Training algorithm	تابع فعالیت Function	تعداد نرون لایه مخفی The number of neurons in hidden layer	RMSE	R ²
بریکس (g/ 100 ml)	CFBP	LM	Logsig	20	1.38	0.71

Brix (g/ 100 ml)						
محتوای رطوبتی (%) Water content (%)	MLP	LM	Logsig	17	1.56	0.74

نتایج پیش‌بینی روش طیف‌سنجی دی‌الکتریک

به منظور حذف نویز از طیف‌های دی‌الکتریک از هموارسازی با استفاده از فیلتر ساویتزکی-گولای استفاده شد. نتایج مدل‌های بدست آمده با استفاده از روش رگرسیونی PLS با استفاده از طیف‌های دی‌الکتریک در جدول ۵ آورده شده است. دقت مدل بدست آمده در پیش‌بینی بریکس با $R^2_C = 0.74$ ، $RMSEC = 1.13$ ، $RMSE_{CV} = 1.32$ ، $R^2_{CV} = 0.66$ و $R^2_P = 0.59$ ، $RMSEP = 1.84$ برابر است. دقت مدل بدست آمده در پیش‌بینی محتوای رطوبتی با $R^2_C = 0.63$ ، $RMSEC = 1.75$ ، $RMSE_{CV} = 2.04$ ، $R^2_{CV} = 0.53$ و $R^2_P = 0.66$ ، $RMSEP = 1.65$ برابر است. این اختلاف می‌تواند به دلیل تفاوت در شکل پراب باشد که نیازمند بهینه‌سازی در مطالعات آینده می‌باشد.

جدول ۵- نتایج مدل‌های PLS در پیش‌بینی مقدار بریکس و محتوای رطوبتی با استفاده از طیف‌های دی‌الکتریک

Table 5. The results of PLS models in prediction of Brix and water content from dielectric spectra

متغیر Variable	R^2_C	RMSEC	R^2_{CV}	RMSECV	R^2_P	RMSEP	LV
بریکس (g/ 100 ml) Brix (g/ 100 ml)	0.74	1.13	0.66	1.32	0.59	1.84	10
محتوای رطوبتی (%) Water content (%)	0.63	1.75	0.53	2.04	0.66	1.65	10

نتایج شبکه‌های عصبی در مدل‌سازی داده‌های حسگر دی‌الکتریک به منظور پیش‌بینی درصد محتوای رطوبت و بریکس ساقه‌های نیشکر در جدول ۶ گزارش شده است. همانطور که مشاهده می‌شود شبکه عصبی CFBP با الگوریتم آموزش لونبرگ - مارکواریت و تابع فعال‌ساز لگاریتمی، در بین سایر شبکه‌های عصبی و الگوریتم‌های آموزشی، بهترین نتایج را در پیش‌بینی هر دو پارامتر دارا می‌باشد هرچند بطور کلی از دقت بالایی نسبت به روش رگرسیونی PLS برخوردار نمی‌باشند.

جدول ۶- نتایج اعتبارسنجی بهترین شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی بریکس و محتوای رطوبتی با استفاده از طیف‌های دی‌الکتریک

Table 6. The validation results of the best neural networks in prediction of Brix and water content from dielectric spectra

متغیر Variable	نوع شبکه Network	الگوریتم آموزش Training algorithm	تابع فعالیت Function	تعداد نرون لایه مخفی The number of neurons	RMSE	R^2
-------------------	---------------------	--------------------------------------	-------------------------	---	------	-------

type	in hidden layer					
بریکس (g /100) (ml) Brix	CFBP	LM	Logsig	18	2.09	0.51
محتوای رطوبتی (%) Water content (%)	CFBP	LM	Logsig	21	1.86	0.56

تلفیق داده‌ها

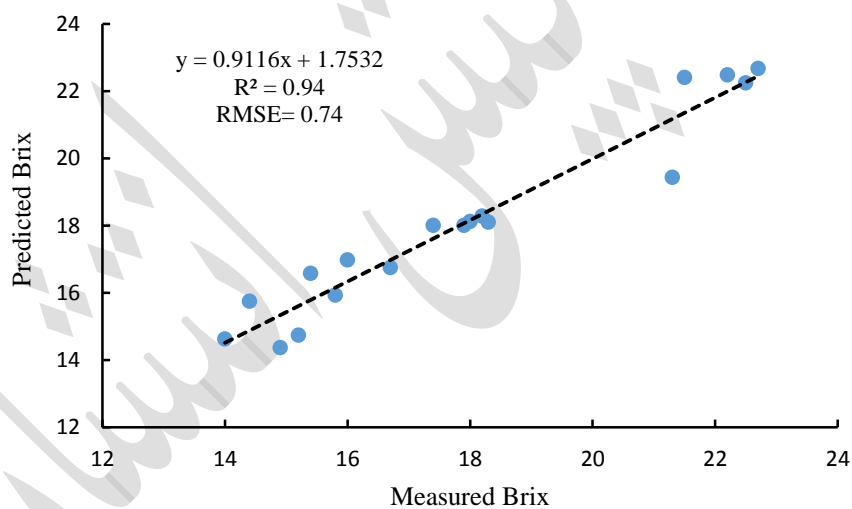
در این مطالعه قابلیت دو روش تلفیق داده سطح پایین و سطح متوسط در پیش‌بینی مقادیر بریکس و محتوای رطوبت نمونه‌های نیشکر مورد بررسی قرار گرفت. در تلفیق داده سطح پایین، داده‌های بدست آمده از روش NIR و دی‌الکتریک پس از پیش پردازش، در یک ماتریس واحد با روش رگرسیون PLS تحلیل شد. با توجه به اینکه در تحلیل داده‌های NIR دو روش پیش‌پردازش MSC و SNV به ترتیب در پیش‌بینی بریکس و محتوای رطوبت بهترین نتایج را نشان دادند، در این قسمت نیز از داده‌های پیش پردازش شده با این دو روش استفاده شد. نتایج مدل‌های حاصل از تلفیق داده‌ها در سطح پایین در جدول ۷ نشان داده شده است. دقت مدل‌ها برای پیش‌بینی بریکس $R^2_c = 0.79$ ، $RMSE_C = 1/0.7$ ، $R^2_{cv} = 0.65$ ، $RMSE_{CV} = 1/4$ ، $R^2_p = 0.65$ ، $RMSE_P = 1/3.7$ و برای پیش‌بینی محتوای رطوبت $R^2_c = 0.69$ ، $RMSE_C = 1/5.8$ ، $R^2_{cv} = 0.52$ ، $RMSE_{CV} = 2/0.1$ ، $R^2_p = 0.53$ ، $RMSE_P = 2/0.1$ بدست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که دقت مدل‌های PLS بدست آمده از تلفیق داده سطح پایین نسبت به مدل‌های مشابه در تحلیل‌های جداگانه برای روش‌های NIR و دی‌الکتریک کاهش پیدا کرده است. در ادامه به منظور انجام تلفیق داده سطح متوسط از متغیرهای پنهانی مدل‌های PLS منتخب به عنوان ورودی مدل استفاده شد. نتایج بدست آمده حاکی از بهبود قابل توجه دقت مدل‌های PLS حاصل در پیش‌بینی مقدار بریکس و محتوای رطوبت می‌باشد. همانطور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود دقت این روش در پیش‌بینی بریکس $R^2_c = 0.95$ ، $RMSE_C = 0.92$ ، $RMSE_C = 0.92$ ، $R^2_c = 0.92$ ، $RMSE_C = 0.66$ و در پیش‌بینی محتوای رطوبت $R^2_c = 0.88$ ، $RMSE_C = 1/0.0$ ، $R^2_{cv} = 0.77$ ، $RMSE_{CV} = 1/1.7$ ، $R^2_p = 0.77$ حاصل شد. همچنین نتایج صحت‌سنجی مدل‌های مذکور موید دقت بسیار مطلوب‌تر مدل‌های به دست آمده نسبت به روش تلفیق سطح پایین می‌باشد طوری که برای مدل توصیف کننده بریکس مقادیر $R^2_p = 0.94$ ، $RMSE_P = 0.74$ و برای محتوای رطوبت $R^2_p = 0.89$ ، $RMSE_P = 0.93$ حاصل شد. مقادیر پیش‌بینی شده بریکس و رطوبت در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده بدست آمده با استفاده از روش تلفیق داده سطح متوسط در شکل ۷ نشان داده شده است.

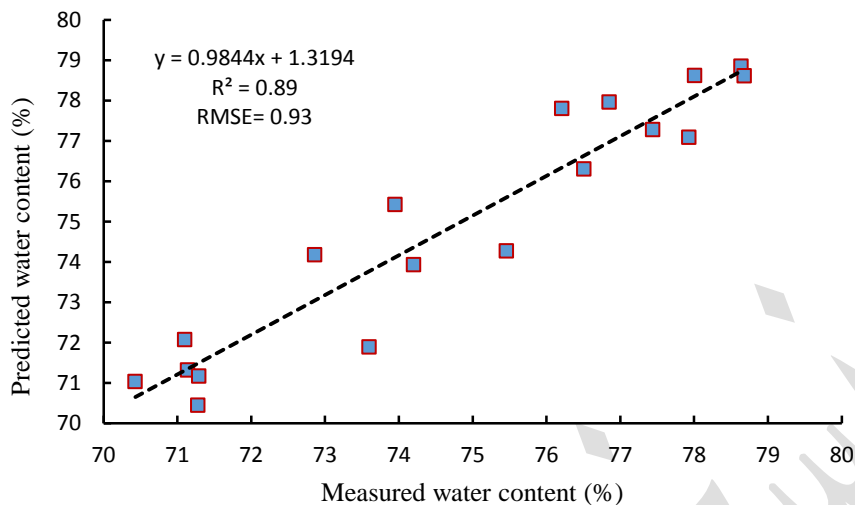
دقت حاصل با مدل‌های تلفیق داده برای پیش‌بینی بریکس در مقایسه با مطالعات انجام شده صرفاً با روش NIR نتیجه مطلوبی است. با اینحال برخی منابع خطا در اندازه‌گیری بریکس مرجع می‌تواند عامل کاهش دقت باشد. برای مثال در روش استاندارد آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری بریکس از استات سرب برای شفافیت نمونه قبل از اندازه‌گیری با رفرکتومتر استفاده می‌شود در حالیکه در مطالعه حاضر عصاره استخراج شده فقط با کاغذ صافی و بدون استفاده از هر گونه ماده شیمیایی تهیه شد.

جدول ۷- نتایج مدل‌های PLS در پیش‌بینی مقدار بریکس و محتوای رطوبتی بر مبنای روش‌های تلفیق داده

Table 7. The results of PLS models in prediction of Brix and water content with data fusion methods

متغیر Variable	سطح تلفیق داده Data fusion level	R^2_c	RMSE _C	R^2_{cv}	RMSE _{CV}	R^2_p	RMSE _P	LV
بریکس Brix	پایین Low	0.79	1.07	0.65	1.4	0.65	1.27	6
بریکس Brix	متوسط Intermediate	0.95	0.92	0.92	0.66	0.94	0.74	5
محتوای رطوبت Water content	پایین Low	0.69	1.58	0.52	2.01	0.53	2.01	5
محتوای رطوبت Water content	متوسط Intermediate	0.88	1	0.77	1.17	0.89	0.93	4





شکل ۷- نتایج اعتبارسنجی مدل‌های PLS تلفیق داده سطح متوسط الف) مقدار بریکس ب) محتوای رطوبتی

Fig. 7. The validation results of PLS models with intermediate fusion level for prediction of a) Brix and b) water content

نتیجه گیری کلی

در این مطالعه روش‌های طیف‌نگاری دی‌الکتریک و طیف‌سنجی بازتابی Vis-SWNIR برای اندازه‌گیری غیر مخرب مشخصه‌های کیفی نیشکر شامل غلظت قند (Brix) و محتوای رطوبت ساقه نیشکر مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور ایجاد مدل‌های توصیف کننده ویژگی‌های کیفی، روش‌های تحلیلی رگرسیونی PLS و شبکه عصبی مصنوعی مقایسه شد. در ابتدا مدل‌های پیش‌بینی با استفاده مستقیم و جداگانه از داده‌های حاصل از هر کدام از روش‌های طیف‌نگاری دی‌الکتریک و طیف‌سنجی Vis-SWNIR مورد بررسی قرار گرفت و سپس توانایی روش‌های تلفیق داده در افزایش کارایی مدل‌های توصیف کننده بررسی شد. بهترین نتیجه برای هر کدام از روش‌های اندازه‌گیری دی‌الکتریک و طیف‌سنجی Vis-SWNIR خطای اندازه‌گیری بریکس به ترتیب ۱/۱۳۶ و ۱/۸۸ را ارائه داد که نشان دهنده دقت مطلوب‌تر روش Vis-SWNIR می‌باشد. با تلفیق دو روش در سطح متوسط، خطای اندازه‌گیری بریکس به ۰/۷۴ کاهش یافت که در مقایسه با نتایج دیگر مطالعات بهبود قابل توجهی است. براساس نتایج به دست آمده، سامانه اندازه‌گیری براساس تلفیق روش‌های طیف‌نگاری دی‌الکتریک و طیف‌سنجی Vis-SWNIR توانایی اندازه‌گیری مقادیر بریکس و محتوای رطوبت ساقه نیشکر را دارد. با توجه به اهمیت اندازه‌گیری خصوصیات کیفی نیشکر در طول مراحل رشد و داشت آن، این تحقیق می‌تواند در توسعه یک حسگر ترکیبی قابل حمل به منظور تشخیص سریع و غیرمخرب پارامترهای کیفی این محصول نقش به‌سزایی داشته باشد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از نتایج طرح تحقیقاتی اجرا شده به شماره قرارداد از محل اعتبارات معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهرکرد می‌باشد. از حمایت مالی دانشگاه برای اجرای این طرح قدردانی می‌گردد همچنین از پشتیبانی شرکت کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر خوزستان برای تهیه و ارسال نمونه‌های نیشکر قدردانی می‌گردد.

REFERENCES

- Aldeza, C.G., Botella, M., Toldr, P. & Fito, P. (2010). Low frequency dielectric spectrum to determine pork meat quality. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 11(2), 376-386. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2010.01.011>
- Anonymous, (2018). Agriculture – Iran – Statistics: *Agriculture Agricultural census*. 2016-2017, 1: 47-48. (In Persian).
- Augusto, P. & Filho, C. (2009). Rapid determination of sucrose in chocolate mass using near infrared spectroscopy. *Analytica Chimica Acta*, 631, 206–211. <https://doi.org/10.1016/J.ACA.2008.10.049>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109775>
- Bagherpour, H., Minaei, H., Abdollahian Noghabi, M., & Khorasani Fardvani, M. E. (2015). Non-destructive determination of sugar content in root beet by near infrared spectroscopy (NIRS). *Food Science and Technology*. 46 (12), 219-228 (In Persian with English abstract).
- Biancolillo, A., R. Bucci, & F. Marini. (2014). Data-fusion for multiplatform characterization of an Italian craft beer aimed at its authentication. *Analytica Chimica Acta*, 820, 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2014.02.024>
- Blakey, R.T. Morales-Partera, A.M. (2016). Microwave dielectric spectroscopy – A versatile methodology for online, non-destructive food analysis, monitoring and process control. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 9(3), 264-273. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2016.02.001>
- Bobelyn, E., Serban, A. S., Nicu, M., Lammertyn, J., Nicoli, B. M. & Saeys, W. (2010). Postharvest quality predicted by NIR-spectroscopy: Study of the effect of biological variability on spectra and model performance. *Postharvest Biology and Technology*, 55 (3), 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2009.09.006>
- Borras, E., Ferre, J., Boque, R., Mestres, M., Acena, L. & Busto, O. (2015). Data fusion methodologies for food and beverage authentication and quality assessment—A Review. *Analytica Chimica Acta*, 891 (3), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.04.042>
- Castanedo, F. (2013). A Review of Data Fusion Techniques. Hindawi Publishing Corporation, 2013, 1-19.
- Chiatrakul, J., Terdwongworakul, A., Phuangsombut, K., Phuangsombut, A. (2022). Improved evaluation of commercial cane sugar content in sugarcane stalk using near infrared hyperspectral imaging and stalk axis rotation technique. *Biosystems Engineering*, 223, 161-173. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.08.019>
- Choi, J.H., Chen, P.A., Lee, B. & Yim, S.H. (2017). Portable, non-destructive tester integrating VIS/NIR reflectance spectroscopy for the detection of sugar content in Asian pears. *Scientia Horticulturae*, 220 (16), 147-153. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.03.050>
- Cole M. R., Eggleston, G., Gilbert, A. & Chung, Y. J. (2016). Development of an analytical method to measure insoluble and soluble starch in sugarcane and sweet sorghum products. *Food chemistry*, 190, 50-59. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.049>
- FAO. 2021. Food and Agricultural Organization of United Nations. Statistical Yearbook 2021. Rome. <http://doi.org/10.4060.cb4477en>

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.02.002>
- Fu, X., Ying, Y., Lu, H., Xu, H. & Yu, H. (2007). FT-NIR diffuse reflectance spectroscopy for kiwifruit firmness detection. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 1, 29-35. <https://doi.org/10.1007/s11694-007-9004-2>
- Gaci, B., Garcia, S.M., Abdelghafour, F., Adrian, J., Maupas, F., & Roger, J.M. (2022). Assessing the potential of a handheld visible-near infrared microspectrometer for sugar beet phenotyping. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 30(3), 122-129. <https://doi.org/10.1177/09670335221083448>
- Garcia, A., Torres, J.L., De Blas, M., De Francisco, A. & Illanes, R. (2004). Dielectric characteristics of grape juice and wine. *Journal of Biosystems Engineering*, 88 (3), 343-349. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.04.008>
- Ghasemi-Varnamkhasti, M., Ghatreh-Samani, N., Naderi-Boldaji, M., Forina, M., Bonyadian, M. (2017). Development of two dielectric sensors coupled with computational techniques for detecting milk adulteration. *Computers and Electronics in Agriculture*, 140, 266-278. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.06.005>
- Goodarzi, N., Movahhed, S., Shakouri, M.J., & Ahmadi Chenarbon, H. (2022). Feasibility of Visible/Near Infrared (Vis/NIR) Spectroscopy capability in classification of lemon samples during storage period by PCA, LDA and SVM identification methods. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 18, 335-352. <https://doi.org/10.52547/fsct.18.120.26>
- Guo, W., Nelson, S. O., Trabelsi, S. & Kays, S. J. (2007). Dielectric properties of honeydew melons & correlation with quality. *Microwave Power & Electromagnetic Energy*, 41(2), 4454. <https://doi.org/10.1080/08327823.2006.11688556>
- Guo, W., Zhu, X., Liu, Y., Zhuang, H. (2010). Sugar and water contents of honey with dielectric property sensing. *Journal of Food Engineering*, 97(2), 275-281. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.10.024>
- Heise, H. M. & Winzen, R. (2006). Chemometrics in Near-Infrared Spectroscopy. In: Siesler, H. W., Ozaki, Y., Kawata, S. and Heise, H. M. (Eds.) *Near-Infrared Spectroscopy: Principles, Instruments, Applications*. 3rd Reprint. WileyVCH. Germany.
- Hoog, N.A., Olthuis, W., Mayer, M.J.J., Yntema, D., Miedema, H., van den Berg, A. (2012). Online 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>
- Jamshidi, B., Minaei, S., Mohajerani, E. & Ghassemian, H. (2012). Reflectance Vis/NIR spectroscopy for nondestructive taste characterization of Valencia oranges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 85, 64-69. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.03.008>
- Jamshidi, B., Minaei, S., Mohajerani, E. & Ghassemian, H. (2014). Effect of spectral pre-processing methods on non-destructive quality assessment of oranges using NIRS. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 167, 264-271. <https://doi.org/10.22092/JAER.2014.100188> (In Persian with English abstract)
- Kaps, M. & Lamberson, W.R. (2009). *Biostatistics for Animal Science*. CABI publishing, Cambridge, MA, USA.
- Korel, F., Luzuriaga, D. & Balaban, M. O. (2001). Objective quality assessment of raw tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets using electronic nose and machine vision. *Journal of Food Science*, 66(7), 1018–1024.
- Lal Mathur RB, 1990. *Handbook Of cane sugar technology*. Oxford & Ibh Publishing Co. India. pp:11.
- Langford, V.S., McKinley, A.J. & Quickenden, T.I. (2001). Temperature Dependence of the Visible-Near-Infrared Absorption Spectrum of Liquid Water. *Journal of Physical Chemistry A*, 105, 8916–8921. <https://doi.org/10.1021/jp010093m>
- Luzuriaga, D. A. (1999). Application of computer vision and electronic nose technologies for quality assessment of color and odor of shrimp and salmon. *PhD dissertation, Department of Food Science and Technology*, University of Florida, Gainesville, FL.
- Magalhaes, P. S. G. & Cerri, D. G. P. (2007). Yield monitoring of sugar cane. *Biosystems Engineering*, 96(1), 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.10.002>

- Magwaza, L. S., Opara, U. L., Terry, L. A., Landahl, S., Cronje, P. J. R., Nieuwoudt, H. H., Hanssens, A., Saeys, W. & Nicolai, B. M. (2013). Evaluation of Fourier transform-NIR spectroscopy for integrated external and internal quality assessment of Valencia oranges. *Journal of Food Composition and Analysis*, 31(1), 144-154. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2013.05.007>
- Mehrotra, R. & Siesler, H. W. (2003). Application of mid infrared/near infrared spectroscopy in sugar industry. *Applied Spectroscopy Reviews*, 38(3), 307-354. <https://doi.org/10.1081/ASR-120024392>
- Mireei S.A., Mohtasebi S.S., Masoodi R., Rafiei S.H., Arabanian A.S. (2010). Application of FT-NIR spectroscopy in nondestructive maturity determination of Shahani date fruit. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 41(2), 113-120. (in Persian with English abstract)
- 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: Physical*, 247, 289-297. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.06.012>
- Moomkesh, S., Mireei, S.A., Sadeghi, M. & Nazeri M. (2017). Non-destructive prediction of quality parameters of sweet lemon (*Citrus limetta*) by Vis-SWNIR spectroscopy. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 47(4): 603-613. <https://doi.org/10.22059/IJBSE.2017.61991> (in Persian with English abstract).
- Naderi-Boldaji, M., Fazelian-Dehkordi, M., Mireei, A. & Ghasemi-Varnamkhasti, M. (2015). Dielectric power spectroscopy as a potential technique for the non-destructive measurement of sugar concentration in sugarcane. *Journal of 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>
- Nawi, M. N., Chen, G., Jensen, T. & Mehdizadeh, S. A. (2013). Prediction and classification of sugar content of sugarcane based on skin scanning using visible and shortwave near infrared. *Biosystems Engineering*, 115(2), 151-161. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.03.005>
- Nawi, N. M., Jensen, T. & Chen, G. (2012). The application of spectroscopic methods to predict sugarcane quality based on stalk cross-sectional scanning. *Journal of American Society of Sugar Cane Technologists*, 32: 16 -27.
- Nelson, S.O. (2004). Agricultural applications of dielectric spectroscopy. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 39(2):75-85. <https://doi.org/10.1080/08327823.2004.11688510>
- Pan, L., Zhu, Q., Lu, R., & McGrath, J. M. (2015). Determination of sucrose content in sugar beet by portable visible and near-infrared spectroscopy. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 167(15), 264-271. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.06.117>
- Pandiselvam, R., Prithviraj, V., Manikantan, M.R., Kothakota, A., Rusu, A.V., Trif, M., & Khaneghah, A.M. (2022). Recent advancements in NIR spectroscopy for assessing the quality and safety of horticultural products: A comprehensive review. *Frontiers in Nutrition*, 9: 973457. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.973457>
- Peirs, A., Lammertyn, J., Ooms, K., & Nicolai, B. M. (2001). Prediction of the optimal picking date of different apple cultivars by means of VIS: NIR-spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, 21(2), 189-199. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(00\)00145-9](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(00)00145-9)
- Rudnitskaya, A., Kirsanov, D., Legin, A., Beullens, K., Lammertyn, J. & Nicolai, B. M. (2006). Analysis of apples varieties – Comparison of electronic tongue with different analytical techniques. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 116(1-2), 23-28. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.11.069>
- Sanaeifar, A., Jafari, A., & Golmakani, M.T. (2018). Fusion of dielectric spectroscopy and computer vision for quality characterization of olive oil during storage. *Computers and Electronics in Agriculture*, 145, 142-152. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.035>
- Sirisomboon, P. (2018). NIR spectroscopy for quality evaluation of fruits and vegetables. *Materials Today: Proceedings*, 5(10), 22481-22486.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.619>

Skierucha, W. Wilczek, A. & Szypowska, A. (2012). Dielectric spectroscopy in agrophysics. *International Agrophysics*, 26, 187-197.

<https://doi.org/10.2478/v10247-012-0027-5>

Soltani, M., Alimardani, R. & Omid, M. (2011). Evaluating banana ripening status from measuring dielectric properties. *Journal of Food Engineering*, 105(4), 625-631. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.03.032>

Xiaobo, Z., Jiewen, Z., Xingyi, H. & Yanxiao, L. (2007). Use of FT-NIR spectrometry in non-invasive measurements of soluble solid contents (SSC) of 'Fuji' apple based on different PLS models. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 87(1), 43-51. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2006.09.003>

