



آزمون در حال جریان یک حسگر دی‌الکتریک استوانه‌ای برای اندازه‌گیری غلظت قند شربت چغندر قند

حامد خلیلیان^۱، مجتبی نادری بلداجی^{۲*}، مهدی قاسمی ورنامخواستی^۲، سجاد رستمی^۲

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

(تاریخ دریافت: ۹۵/۷/۶، تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۲۹)

چکیده

این پژوهش به منظور اندازه‌گیری در حال جریان غلظت قند شربت چغندر قند با درصدهای بریکس ۵/۲۶، ۹/۳۷، ۷/۴۸، ۱/۵۴ و ۲/۶۲ در دو سطح دبی ۰/۰۲ و ۰/۰۴ لیتر بر ثانیه با جریانی آرام با استفاده از یک حسگر دی‌الکتریک استوانه‌ای انجام شد. این حسگر شامل یک استوانه فولادی و مغزی به‌عنوان قطب‌های خازن می‌باشد که توسط کابل هم‌محور به دستگاه‌های ژنراتور و تحلیل‌گر طیف متصل می‌شود. شربت از طریق مجرای پایینی وارد محفظه حسگر شده و از طریق مجرای بالایی از آن خارج می‌گردد. اثر دما در بازه ۲۵ تا ۷۵ °C و بازه فرکانسی ۰ تا ۱۵۰ مگاهرتز بر تخمین ضریب گذردهی دی‌الکتریک شربت در حال سکون در حسگر نیز بررسی شد. نتایج نشان داد که ضریب گذردهی دی‌الکتریک شربت در حال جریان در هر تناوب تشدید در دبی ۰/۰۲ بزرگ‌تر از این ضریب در حال سکون و با افزایش دبی جریان به ۰/۰۴ لیتر بر ثانیه کاهش داشته است. آزمون تغییر دما برای شربت در حالت سکون مشخص نمود که فقط فرکانس تشدید تناوب دوم تحت تاثیر دما بوده که کاهش ضریب گذردهی دی‌الکتریک با افزایش دما را نتیجه داد ولی فرکانس تشدید اول با دما تغییر قابل ملاحظه‌ای نداشت. با توجه به نتایج حاصل، روش دی‌الکتریک می‌تواند تنها با اصلاح اثر دبی جریان در تخمین ضریب دی‌الکتریک به‌عنوان یک روش توانمند و کاربردی در اندازه‌گیری در حال جریان (برخط) درصد بریکس شربت چغندر قند باشد.

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

1- مقدمه

قند یک محصول با ارزش و راهبردی است و سنبلیله نعمت محسوب می‌شود. شکر یکی از مهم‌ترین مواد غذایی مورد نیاز انسان است که در بدن تولید انرژی و حرارت می‌کند. قیمت ارزان شکر در مقایسه با مقدار کالری که ایجاد می‌کند، این محصول را به صورت منبعی اساسی در تأمین انرژی غذایی مبدل کرده است. تقریباً 60 درصد قند تولیدی دنیا از نیشکر و بقیه از چغندر قند تهیه می‌شود [1]. حدود 70 تا 80٪ وزن تر چغندر قند را آب تشکیل داده که در تمام اندام‌های این گیاه موجود است. آب عامل اصلی انتقال قند از برگ به ریشه می‌باشد. قسمت بالایی ریشه چغندر قند محل اصلی ذخیره قند در این گیاه است و حدود 16٪ از وزن ریشه چغندر قند را شامل می‌شود [2]. درصد بریکس یکی از متداول‌ترین معیارهای سنجش عیار (غلظت) قند چغندر قند است. این درصد نشان‌دهنده درصد وزن مواد جامد موجود در صد گرم محلول (شربت چغندر قند) می‌باشد. ساکارز از مهم‌ترین قندهای موجود در ریشه چغندر بوده که حدود 95٪ از کل قند موجود در این محصول را شامل می‌شود. در کارخانه قند، شربت خام چغندر قند تحت چندین مرحله فرایند تصفیه و تغلیظ با دیفوزیون¹ قرار می‌گیرد که طی آن غلظت قند شربت از تقریباً 12 تا حدود 90٪ افزایش می‌یابد. پایش و کنترل غلظت در مراحل مختلف این فرایند از اهمیت بالایی در صنعت قند برخوردار بوده و می‌تواند بر کمیت و کیفیت شکر تولید شده تأثیر به‌سزایی داشته باشد. استفاده از حسگرهای رفرکتومتر از جمله فناوری‌هایی می‌باشد که تاکنون در صنایع شکر، جهت اندازه‌گیری آزمایشگاهی و یا برخط غلظت قند به‌کار گرفته شده است. این حسگرها با اندازه‌گیری زاویه شکست نور عبور داده شده از طریق محلول، درصد بریکس را اندازه‌گیری می‌کنند. از معایب این فناوری هزینه‌های بالای اولیه و نگهداری و همچنین نیازمند بودن آن به واسنجی‌های دوره‌ای جهت اندازه‌گیری دقیق می‌باشد. از جمله روش‌های دیگری که می‌تواند در صنعت شکر به‌کار گرفته شود، استفاده از حسگرهای دی‌الکتریک است. این روش نسبت به روش رفرکتومتری ارزان و ساده‌تر بوده و قادر به اندازه‌گیری غلظت قند شربت چغندر قند به‌صورت برخط (در حال جریان) نیز می‌باشد [3].

در روش‌های طیف‌سنجی دی‌الکتریک پارامترهای مختلف فیزیکی ماده مانند قطبش، گذردهی و افت دی‌الکتریک در پاسخ به یک جریان متناوب و در یک طیف وسیع فرکانس اندازه‌گیری می‌شود [4]. حسگرهای خازنی و یا میکروویوی از حسگرهای رایجی هستند که برای اندازه‌گیری طیف‌های دی‌الکتریک استفاده می‌شوند. از جمله مزایای استفاده از این حسگرها، صحت و دقت آن‌ها و قابلیت به‌کارگیری آن‌ها برای اندازه‌گیری غیرمخرب کیفیت مواد غذایی و کشاورزی است.

مرور منابع علمی حاکی از توسعه و استفاده روزافزون روش‌های دی‌الکتریک در فناوری غذایی می‌باشد. مطالعه‌ای روی شراب قرمز و شیر انگور برای دستیابی به میزان مواد جامد محلول (درصد بریکس) آن‌ها با استفاده از تکنیک مدار باز و کابل هم‌محور در دمای 20 درجه سلسیوس در دو فرکانس 200 مگاهرتز و 3 گیگاهرتز انجام شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که ضریب گذردهی دی‌الکتریک و فاکتور افت در فرکانس 200 مگاهرتز برای شیر انگور بیش‌تر از شراب قرمز بود. هم‌چنین فاکتور افت در این فرکانس بیش‌ترین مقدار خود را داشت. در حالت کلی این فاکتور در فرکانس 3 گیگاهرتز برای شراب و شیر انگور یکسان بود [5].

در مطالعه‌ای خواص دی‌الکتریک میرین (نوعی شراب برنج مطبوع) در بازه فرکانسی 300 تا 3000 مگاهرتز در محدوده دمایی 5 تا 70 درجه سلسیوس اندازه‌گیری شد. در این مطالعه تأثیر فرکانس و دما روی خواص دی‌الکتریک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش فرکانس و دما، ضریب گذردهی دی‌الکتریک روندی نزولی داشت [6].

در یک مطالعه، مقدار ساکارز موجود در عصاره نیشکر با استفاده از یک حسگر تشدید کننده میکرواستریپ¹ در حالت سکون مایع اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که ضریب دی‌الکتریک رابطه‌ای معکوس با فرکانس تشدید دارد. با کاهش درصد قند محلول در نمونه آب نیشکر، مقدار ضریب گذردهی دی‌الکتریک افزایش یافت. این نتایج نشان داد که روش دی‌الکتریک می‌تواند روشی سریع و دقیق برای برآورد درصد ساکارز محلول در عصاره نیشکر باشد [7]. با این حال گزارشی از آزمون این حسگر در حالت جریان مایع ارائه نشده است.

1. Micro strip

1. diffusion

ترکیب با ژنراتور برای اندازه‌گیری‌های دی الکتریک می‌باشد که دستگاه نسبتاً ارزان‌تری در مقایسه با تحلیل‌گر بردار می‌باشد که در اکثر مطالعات با استفاده از آن ضریب دی الکتریک و فاکتور افت به‌طور مستقل اندازه‌گیری می‌شوند. همچنین قابلیت عبور جریان از طریق حسگر دیگر مزیت برجسته این روش می‌باشد که امکان پایش کیفی سیالات غذایی در فرایندهای تولید را مهیا می‌کند. در بخش اول این مطالعه، یک حسگر دی الکتریک استوانه‌ای به‌منظور کاربرد در صنایع قند (و به‌طور کلی برای سایر سیالات غذایی و کشاورزی) طراحی و آزمون شد. نتایج آزمون‌های در حال سکون شربت چغندر قند با بریکس‌های متفاوت نشان داد که حسگر توسعه داده شده به‌خوبی قادر به تشخیص تغییرات بریکس در شربت چغندر می‌باشد. هدف این بخش از مطالعه، آزمون حسگر در حالت جریان مایع جهت استفاده در اندازه‌گیری برخط غلظت قند در فرایند استحصال قند از شربت در کارخانه قند می‌باشد. همچنین در این مطالعه اثر دما بر ضریب گذردهی دی الکتریک در حال سکون مایع مورد بررسی قرار گرفت. اهمیت جبران اثر دما به این دلیل است که فرایند تغلیظ شربت چغندر در دستگاه‌های دیفیوزر همراه با حرارت بوده و دما نیز اثر معنی‌داری بر ضریب دی الکتریک مواد دارد [3].

2- مواد و روش‌ها

2-1- اصول نظری و ساختار حسگر دی الکتریک

ضریب گذردهی دی الکتریک از جمله خواص فیزیکی یک ماده است که می‌توان با استفاده از حسگرهای خازنی به‌دست آورد. گذردهی دی الکتریک مواد با یک عبارت مختلط (رابطه 1) بیان می‌شود که جزء حقیقی آن بیانگر ضریب گذردهی دی الکتریک (ϵ'_r) یا قابلیت همسویی دوقطبی‌های موجود در ماده با میدان الکتریکی و جز موهومی آن (ϵ''_r)، ضریب افت یا میزان انرژی تلف شده به شکل حرارت در ماده دی الکتریک می‌باشد. تغییر در خصوصیات و ترکیب ماده می‌تواند موجب تغییر در ضرایب دی الکتریک ماده شود.

$$\epsilon_r = \epsilon'_r + j\epsilon''_r \quad (1)$$

به‌منظور بررسی خواص دی الکتریک یک ماده، می‌توان از

هوک و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی خواص دی الکتریک سه سیال آب، اتانول و گلیسرول با استفاده از حسگر دی الکتریک استوانه‌ای (مانند مطالعه حاضر) پرداخته شد. با استفاده از این روش و همچنین استفاده از نظریه خطوط انتقال، اثر جریان سیال (نسبت به مایع در حال سکون) و همچنین تاثیر دما بر خواص دی الکتریک آب بررسی شد. اندازه‌گیری با استفاده از دستگاه تحلیل‌گر طیف در بازه فرکانسی 0 تا 3 گیگاهرتز انجام شد. نتایج نشان داد که ضریب گذردهی دی الکتریک آب در حالت جریان از طریق حسگر نسبت به حالت سکون کوچک‌تر می‌باشد. همچنین با افزایش دما ضریب گذردهی کاهش یافت [8].

در پژوهشی خواص دی الکتریک آرد ذرت در بازه دمایی 25 تا 75 درجه سلسیوس و در محدوده فرکانسی 0/2 تا 10 مگاهرتز اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش فرکانس، ضریب گذردهی دی الکتریک روند نزولی خواهد داشت. با افزایش دما ضریب گذردهی دی الکتریک افزایش یافت [9]. در مطالعه‌ای دیگر خواص دی الکتریک عصاره نارگیل سبز با استفاده از تکنیک مدار انتها باز در دمای 0 تا 90 درجه سلسیوس و در محدوده فرکانسی 500 تا 3000 مگاهرتز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش دما، ضریب گذردهی دی الکتریک در غلظت‌های مختلف عصاره نارگیل سبز روند نزولی دارد. همچنین با افزایش فرکانس ضریب گذردهی دی الکتریک کاهش یافت [10].

در گزارشی طیف‌نگاری توان دی الکتریک با استفاده از حسگر صفحه موازی در محدوده 1 تا 100 مگاهرتز برای تخمین رطوبت خرما ارزیابی شد که نتایج دقیقی نشان داد [4، 11]. با روشی مشابه، مطالعه‌ای در محدوده فرکانس 1 تا 10 مگاهرتز بر روی ساقه نیشکر به‌صورت غیرمخرب انجام شد که نشان داد روش دی الکتریک یک روش توانمند و دقیق در اندازه‌گیری غیرمخرب محتوای رطوبت و غلظت قند نیشکر می‌باشد [12].

آنچه از مطالعات گذشته مشخص است این‌که تا کنون استفاده از روش‌های دی الکتریک برای اندازه‌گیری در حال جریان سیالات غذایی گزارشی نشده است. مزیت روش مورد استفاده در این مطالعه استفاده از دستگاه تحلیل‌گر طیف در

می‌باشد و یک مغزی فولادی در مرکز این استوانه نقش قطب مثبت خازن را دارد. مایع دی‌الکتریک بین این دو الکتروود قرار گرفته و بسته به ضریب گذردهی دی‌الکتریک بر خروجی A-F تاثیر می‌گذارد. همان‌طور که در شکل (1) نشان داده شده، حسگر توسط یک اتصال تی (T) در بین دستگاه‌های ژنراتور و تحلیل‌گر طیف قرار گرفته و الکتروود مغزی آن به قطب مثبت و استوانه بیرونی به قطب منفی مدار متصل می‌شود.

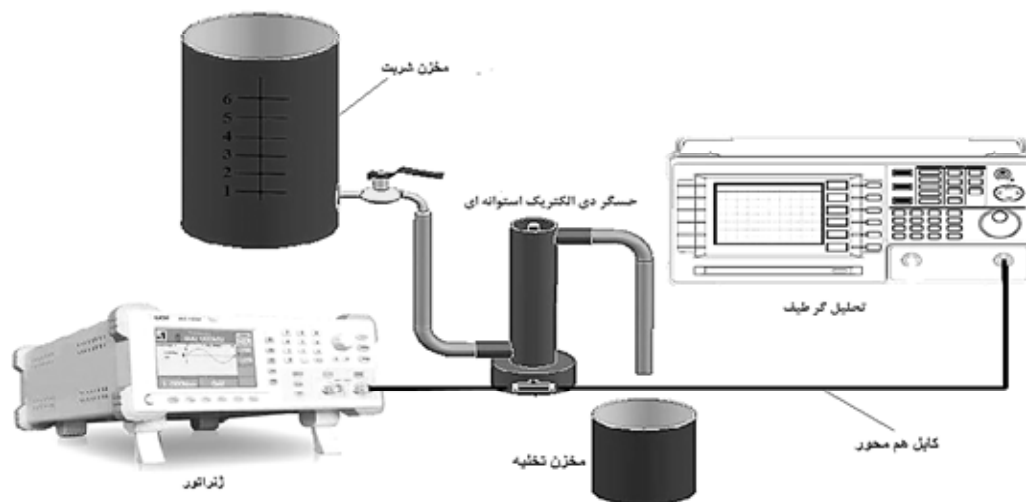
2-2- سامانه دی‌الکتریک در حال جریان مایع

سامانه آزمون در حال جریان حسگر شامل دستگاه ژنراتور 0-150 مگاهرتز (OWON, AG-4151, Hong Kong) می‌باشد که توسط کابل‌های هم‌محور به حسگر و دستگاه تحلیل‌گر طیف (GW-instek, GPS-827, Taiwan) متصل می‌شود. شکل (1) طرح‌واره‌ای از سامانه اندازه‌گیری در حال جریان را نشان می‌دهد. از یک مخزن پلاستیکی مدرج و یک شیر خروجی برای ذخیره و کنترل دبی جریان از طریق حسگر استفاده شد. جهت ورود جریان مایع از پایین به بالا انتخاب شد تا همواره فضای بین دو الکتروود حسگر پر از شربت چغندر قند باشد. اساساً به خاطر ضریب دی‌الکتریک پایین هوا، هر گونه حجم خالی بین دو الکتروود می‌تواند خطای چشم‌گیری در تخمین ضریب دی‌الکتریک مایع داشته باشد. برای یک تشدید ایده‌آل (فرکانس بدون میرایی)، فرکانس تشدید (f_{res}) در معادله مدار باز با رابطه (2) تعریف می‌شود [14].

حسگرهای دی‌الکتریک به دو صورت ایستایی و دینامیکی بهره برد [13]. از جمله عواملی که در حساسیت این دسته از حسگرها تاثیر گذار است، خواص دی‌الکتریک ماده و همچنین هندسه حسگر (هندسه الکتروودها و فاصله بین آنها) می‌باشد [13]. جهت بیان تغییرات طیف دی‌الکتریک تابعی از فرکانس، نیاز به توجیهی برای رفتار حسگر در معرض میدان الکترومغناطی است [14]. این طیف شامل فرکانس تشدید و فرکانس میرایی است و می‌تواند در محدوده فرکانسی وسیعی رفتار ماده دی‌الکتریک را بازتاب کند. در نتیجه سیگنال خروجی می‌تواند به صورت طیف دامنه-فرکانس (A-F) نمایش داده شود. طیف A-F بیانگر اطلاعاتی در مورد ماده دی‌الکتریک درون حسگر فرکانس تشدید آن ماده می‌باشد.

سرعت سیال از جمله عواملی است که باعث تغییر در خواص دی‌الکتریک سیال می‌شود. با افزایش حجم سیال گذرنده از یک مقطع در واحد زمان، سرعت سیال گذرنده در مقطع نیز افزایش می‌یابد که با افزایش آشفتگی سیال در حال جریان باعث کاهش ضریب گذردهی دی‌الکتریک سیال خواهد شد [15].

به منظور اندازه‌گیری فرکانس تشدید دی‌الکتریک و ارتباط آن با غلظت قند شربت چغندر قند از یک حسگر خازنی استوانه‌ای هم‌محور توسعه داده شده در بخش اول این مطالعه استفاده شد [3]. این حسگر شامل یک استوانه فولادی به طول، قطر خارجی و ضخامت به ترتیب 250، 25 و 1 میلی‌متر



شکل (1) طرح‌واره سامانه آزمون دی‌الکتریک در حال جریان شربت چغندر قند

حسگر، فرکانس تغذیه از 0 تا 150 مگاهرتز توسط دستگاه ژنراتور جاروب و نتایج به صورت نمودارهای فرکانس (MHz) بر حسب دامنه (dbm) ثبت گردید. درصد بریکس نمونه‌های شربت با استفاده از دستگاه رفرکتومتر (Ceti Belgium, Quartz, Hong Kong) اندازه‌گیری شد. بدین منظور دو تا سه قطره از محلول شربت روی لنز دستگاه ریخته شد. با عبور نور تکفام از نمونه و اندازه‌گیری زاویه شکست نور درصد بریکس با استفاده از رابطه (3) [16] محاسبه شد [17].

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

n: دوره تناوب فرکانس تشدید،

f_{res} : فرکانس تشدید (Hz)،

L: اندوکتانس بر واحد طول (H/m)،

C: ظرفیت خازنی بر واحد طول (F/m)،

c: سرعت نور در خلا (m/s)،

μ_r : خاصیت مغناطیسی نسبی الکتروود (-)،

ϵ_r : خاصیت گذردهی نسبی دی الکتریک (-)

$$Bx = ((((((11758.74 \times nD - 88885.21) \times nD + 270177.93) \times nD - 413145.80) \times nD + 318417.95) \times nD - 99127.4536)$$

Bx: درصد بریکس و

nD: ضریب شکست اندازه‌گیری شده در بخار سدیم (D) با طول موج 589/3 آنگستروم در دمای 20 درجه سلسیوس.

تشدید در طیف A-F به صورت متناوب و دره‌هایی تیز (افت ناگهانی دامنه) اتفاق می‌افتد. در صورتی که با افزایش فرکانس (تناوب تشدید) افت دره‌ها کاهش یابند، آن تشدید را میرا و در صورت یکنواختی عمق دره‌ها، آن را تشدید ایده‌آل می‌نامند.

3-2 آزمون‌های شربت چغندر قند

1-3-2 آزمون دما

جهت آزمون اثر دما، شربت چغندر قند در سه غلظت 26/5، 37/9 و 62٪ هر کدام در سه دمای 25، 50 و 75 درجه سلسیوس مورد آزمون قرار گرفت. شربت چغندر قند مورد آزمون به‌وسیله یک المنت حرارتی میله‌ای درون مخزن پلاستیکی به دمای مورد نظر رسید و سپس به حسگر استوانه‌ای منتقل شد. جهت به حداقل رسانیدن هدر رفت گرما، فضای خارجی حسگر با عایق پشم شیشه پوشانیده شد. دمای شربت درون حسگر به‌وسیله دماسنج لیزری (Taiwan TES، TES-1327k) کنترل شد.

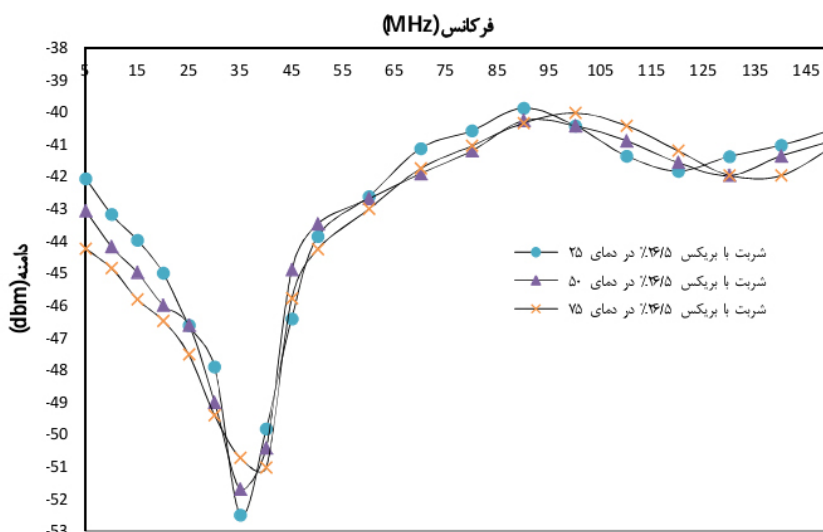
2-3-2 آزمون در حال جریان شربت چغندر قند

جهت آزمون در حال جریان حسگر دی الکتریک، شربت چغندر قند در پنج غلظت قند مختلف با درصد‌های بریکس 26/5، 37/9، 48/7، 54/1 و 62 تهیه گردید. هر کدام از شربت‌ها به صورت مجزا درون مخزن تعبیه شده در بالای حسگر ریخته شد و توسط لوله‌های شفاف به مجرای پایینی حسگر متصل شد. دبی جریان با شیر خروجی مخزن در دو سطح 0/02 و 0/04 لیتر بر ثانیه کنترل شد. در حین جریان شربت از طریق

3- نتایج و بحث

شکل (2) طیف‌های A-F حاصل از آزمون شربت در غلظت 26/5٪ در سه دمای 25، 50 و 75 درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. تغییرات حاکی از آن است که افزایش دما در تناوب اول تشدید فقط تاثیر بر دامنه طیف داشته و فرکانس تشدید تغییر محسوسی نداشته است. اما در تناوب دوم تشدید، تغییرات فرکانسی مشاهده شد. طیف‌های دی الکتریک شربت در دو بریکس 37/9 و 62٪ نیز نتایج مشابهی از تاثیر دما را نشان داد که در جدول (1) گزارش داده شده است. ضریب دی الکتریک با فرکانس‌های تشدید اول و دوم با استفاده از رابطه (2) محاسبه شد که در آن مقادیر ثابت‌های L و μ_r برای جنس استیل به ترتیب 250 میلی‌متر و 1 جایگزین شد [14] و سرعت نور (c) برابر 3×10^8 در نظر گرفته شد.

شکل (3) تغییرات فرکانس‌های تشدید با دما را در تناوب اول و دوم برای شربت‌های با بریکس 26/5، 37/9 و 62٪ نشان می‌دهد. مشخص است که فرکانس تشدید دوم با افزایش دما افزایش داشته در حالی که فرکانس تشدید اول تغییر چندانی نکرده است.



شکل (2) طیف‌های دی‌الکتریک شربت با بریکس 26/5٪ در دماهای مختلف

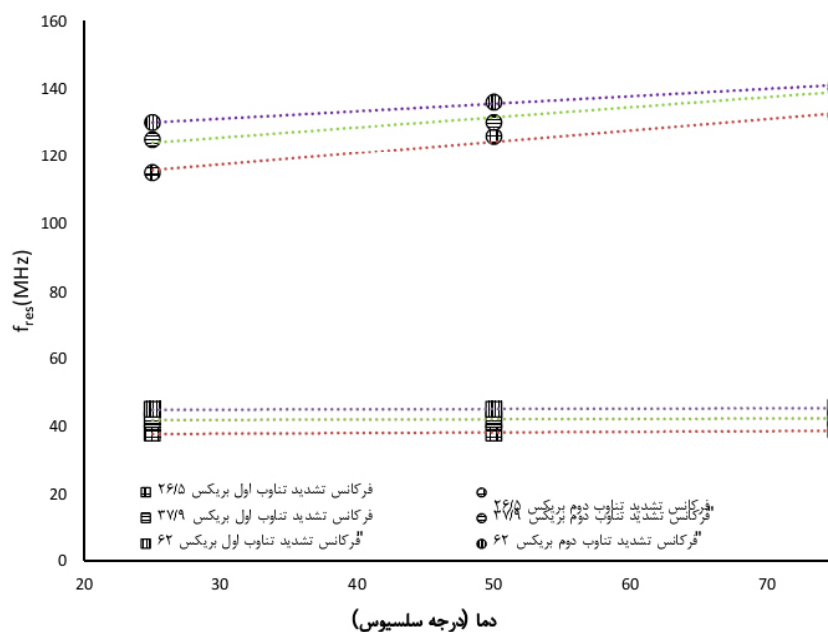
جدول (1) تاثیر افزایش دما در شربت چغندر قند (در حال سکون) بر فرکانس تشدید و ضریب گذردهی دی‌الکتریک

ϵ_2	ϵ_1	$f_{2,res}$ (MHz)	$f_{1,res}$ (MHz)	دما (°C)	(%Brix)
61/24	62/32	115	38	25	
51/02	62/32	126	38	50	26/5
46/48	59/17	132	39	75	
51/84	51/02	125	42	25	
47/92	51/02	130	42	50	37/9
41/32	49/82	140	42/5	75	
47/92	44/45	130	45	25	
43/80	44/45	136	45	50	62
40/74	43/47	141	45/5	75	

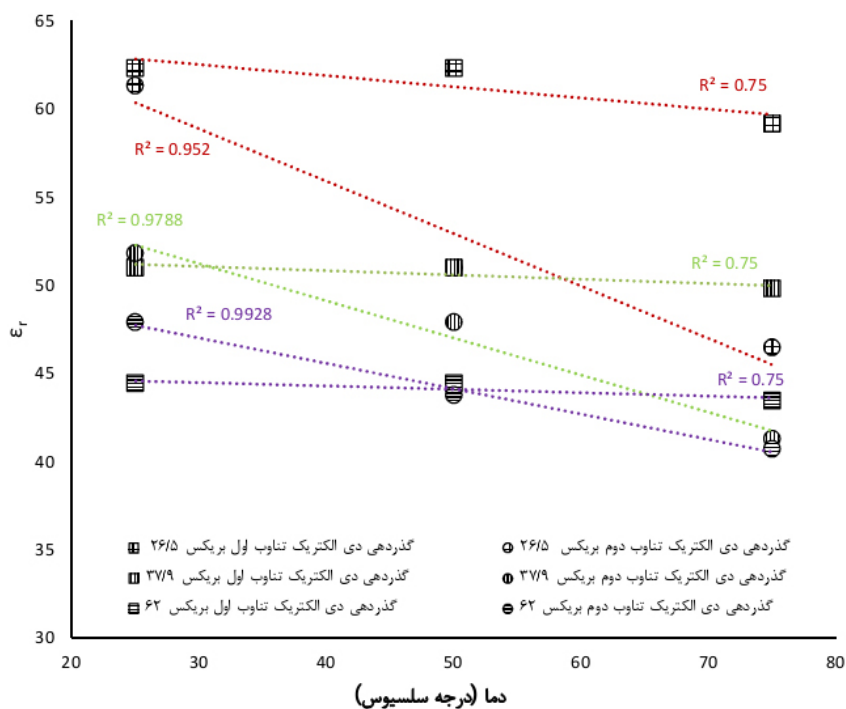
ϵ_1 و ϵ_2 : ضریب گذردهی دی‌الکتریک محاسبه شده از فرکانس تشدید در تناوب اول و دوم
 $f_{1,res}$ و $f_{2,res}$: فرکانس‌های تشدید تناوب اول و دوم

شکل (4) رابطه بین ضریب گذردهی دی‌الکتریک محاسبه شده در تشدید اول و دوم با دما را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ضریب گذردهی محاسبه شده در تشدید اول تحت تاثیر دما تغییر محسوسی نداشته در حالی که ضریب محاسبه شده در تشدید دوم با افزایش دما کاهش یافته است. مطالعه‌ای روی خواص دی‌الکتریک آب با استفاده از حسگر دی‌الکتریک استوانه‌ای مشابه و اثر تغییر دما نشان داد که فرکانس تشدید دوم اثر دما را به شکل درست نشان می‌دهد و ضریب محاسبه شده در تشدید اول اثر دما را بازتاب نمی‌کند [14]. پژوهش‌های دیگری نیز در این زمینه صورت گرفته است که همگی کاهش ضریب گذردهی دی‌الکتریک را با افزایش دما گزارش داده‌اند [6، 10، 18، 19]. با افزایش درجه بریکس نمونه ضریب دی‌الکتریک کاهش یافته است. با حل شدن کربوهیدرات (نشاسته، قند و فیبر) در آب خالص، خواص دی‌الکتریک محلول حاصل نسبت به آب خالص تفاوت خواهد داشت [20]. افزایش تعداد پیوند میان مولکول‌های قند و آب و کاهش تعداد مولکول‌های دوقطبی آزاد آب در شربت چغندر قند غلیظ، سبب کاهش ضریب گذردهی دی‌الکتریک می‌شود [21]. این نتیجه توسط دیگر محققین نیز تایید شده است [6، 7، 12، 22-28]. طبق گزارشی دیگر بالا رفتن درصد ساکارز در آب خالص افت در ثابت دی‌الکتریک را در پی خواهد داشت [29].

جدول (2) مقادیر اندازه‌گیری شده فرکانس تشدید و



شکل (3) فرکانس تشدید بر حسب دما برای شربت چغندر قند در حالت سکون



شکل (4) ضریب گذردهی دی‌الکتریک محاسبه شده در تشدید اول و دوم بر حسب دما برای شربت چغندر قند در حالت سکون

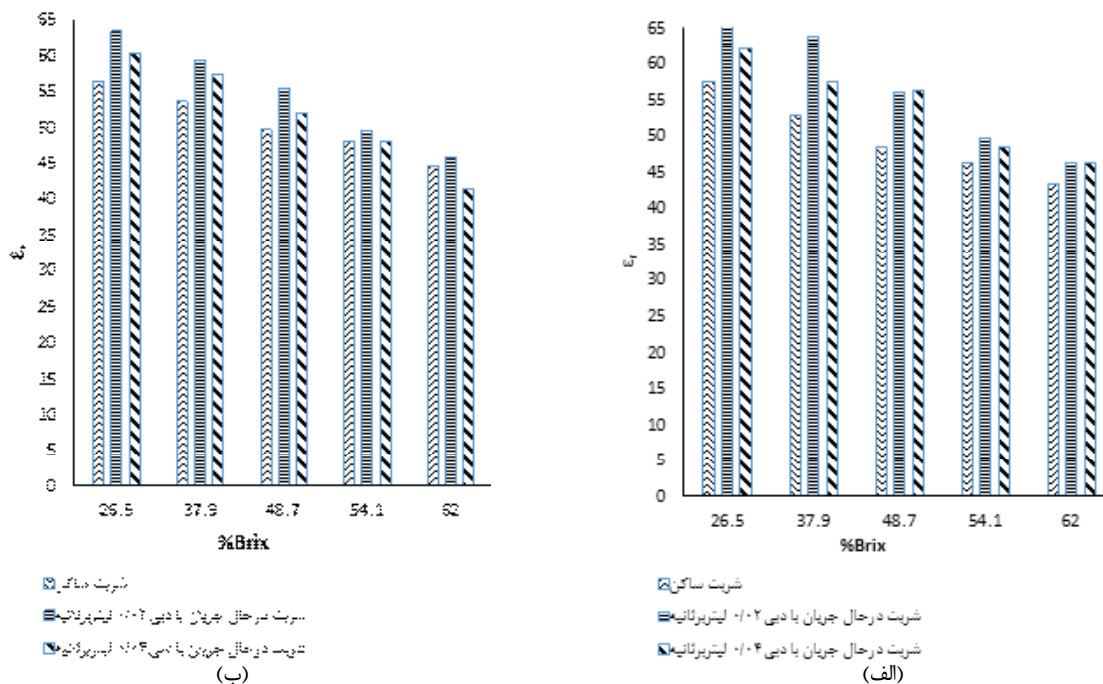
شکل (5) ضریب گذردهی دی‌الکتریک اندازه‌گیری شده در حالت‌های مختلف آزمایش یعنی اندازه‌گیری ضریب گذردهی دی‌الکتریک شربت در حالت سکون [3] را در مقایسه با اندازه‌گیری در حال جریان با دو دبی مختلف برای تناوب اول

مقادیر محاسبه شده ضریب دی‌الکتریک در تشدید اول و دوم را در دمای اتاق (25 درجه سلسیوس) برای آزمون‌های در حال جریان شربت چغندر قند در دو سطح دبی 0/02 و 0/04 لیتر بر ثانیه گزارش می‌دهد.

جدول (۲) تاثیر افزایش غلظت در شربت چغندر قند در حال جریان بر ضریب گذردهی دی‌الکتریک

ϵ_2	ϵ_1	$f_{2,res}$ (MHz)	$f_{1,res}$ (MHz)	دبی (lit/s)	(%Brix)
60/19	62/32	116	38	0/04	26/5
63/43	65/74	113	37	0/02	
57/19	57/68	119	39/5	0/04	37/9
59/17	64	117	37/5	0/02	
51/84	56/25	125	40	0/04	48/7
55/32	56/25	121	40	0/02	
47/92	48/67	130	43	0/04	54/1
49/43	49/82	128	42/5	0/02	
41/32	46/48	140	44	0/04	62
45/79	46/48	133	44	0/02	

ϵ_1 و ϵ_2 : ضریب گذردهی دی‌الکتریک محاسبه شده از فرکانس تشدید در تناوب اول و دوم $f_{1,res}$ و $f_{2,res}$: فرکانس‌های تشدید تناوب اول و دوم



شکل (۵) ضریب دی‌الکتریک شربت چغندر قند در حالت‌های ساکن و جریان محاسبه شده از فرکانس‌های تشدید (الف) تناوب اول و (ب) تناوب دوم و دوم تشدید نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در مقایسه با ضرایب محاسبه شده برای آزمون‌های در حال سکون، ضریب گذردهی در دبی 0/02 افزایش داشته و با افزایش دبی به 0/04 لیتر، ضریب گذردهی نسبت به حالت 0/02 لیتر بر ثانیه کاهش داشته است. اصولاً با افزایش دبی جریان از طریق حسگر، جریان آرام سیال رفته رفته به جریان متلاطم میل کرده که این امر باعث ایجاد بی‌نظمی در قطبش و در نتیجه

کاهش ضریب گذردهی دی‌الکتریک نسبت به دبی کم‌تر شربت می‌گردد [30]. حالت جریان از طریق حسگر استوانه‌ای توسعه داده شده در این مطالعه تحت تاثیر شدت جریان و اثر آن بر اندازه‌گیری‌های دی‌الکتریک امر پیچیده‌ای است که به راحتی قابل پیش‌بینی نبوده و نیاز به انجام آزمون‌های بیش‌تر و بررسی اثر دبی جریان بر پاسخ A-F دارد.

4- نتیجه گیری

دی‌الکتریک شد. با این حال در مقایسه با آزمون‌های در حال سکون شربت، اثر دبی جریان بر ضرایب گذردهی محاسبه شده از تناوب اول و دوم در یک جهت نبود که نیاز به آزمون‌های بیش‌تر را ایجاب می‌نماید. این نتایج توانایی روش دی‌الکتریک در اندازه‌گیری در حال جریان درصد بریکس شربت چغندر قند را نشان می‌دهد. با توجه به تعیین دقیق غلظت قند در شربت چغندر قند به وسیله روش طیف‌نگاری دی‌الکتریک و به کارگیری آسان و ارزان این روش، پیشنهاد می‌شود که این حسگر برای اندازه‌گیری در حال جریان شربت جهت پایش پیوسته غلظت قند در صنایع قند توسعه یابد. هم‌چنین از این روش می‌توان در سایر صنایع غذایی از جمله آب‌میوه استفاده نمود.

در این مطالعه یک حسگر دی‌الکتریک استوانه‌ای برای اندازه‌گیری اثر دما در شربت چغندر قند در حالت سکون و هم‌چنین اندازه‌گیری در حال جریان غلظت قند (بر حسب درصد بریکس) شربت چغندر قند آزمون شد. نتایج نشان داد که با افزایش دما در شربت چغندر قند، فرکانس تشدید دوم دی‌الکتریک افزایش و ضریب گذردهی دی‌الکتریک محاسبه شده از آن کاهش یافت در حالی که فرکانس تشدید تناوب اول تغییر قابل ملاحظه‌ای با دما را نشان نداد. افزایش درصد بریکس شربت و هم‌چنین افزایش دبی جریان ورودی باعث افزایش فرکانس تشدید دی‌الکتریک و کاهش ضریب گذردهی

منابع

- mirin in the microwave frequency range. *J. Food Eng.*, 89, 435-440.
- [7] Jackson, B., Jayanthi, T. (2014). Determination of sucrose in raw sugarcane juice by microwave method. *Indian J. Sci. Technol.*, 7, 566-570.
- [8] Hoog, N. A., Mayer, M. J. J., Miedema, H., Olthuis, W., Tomaszewska, A. A., Paulitsch-Fuchs, A. H., van den-Berg, A. (2015). Online monitoring of biofouling using coaxial stub resonator technique. *J. Sensing and Bio-Sensing Res.*, 3, 79-91.
- [9] Bamsal, N., Dhaliwal, A. S., Mann, K. S. (2015). Dielectric properties of corn flour from 0.2 to 10 GHz. *J. Food Eng.*, 166, 255-262.
- [10] Franco, A. P., Yamamoto, L. Y., Tadini, C. C., Gut, J. A. W. (2015). Dielectric properties of green coconut water relevant to microwave processing: Effect of temperature and field frequency. *J. Food Eng.*, 155, 69-78.
- [11] باقری، ر.؛ میره‌ای، ا.؛ صادقی، م.؛ معصومی، ا.؛ مومکش، ش. (1393) اندازه‌گیری رطوبت خرما با روش غیرمخرب دی‌الکتریک. *مجله مهندسی بیوسیستم ایران*، دوره 45،
- [1] Harland, J. I., Jones, C. K., Hufford, C. (2006) *Sugar beet*. In: Draycott, A. P. (ed.), Chichester, United Kingdom, Blackwell's Publishing, p 514.
- [2] Properties of a Sugar Beet. Sugar Beet, 2013. URL <http://necternal.com/sugar-beets/>. Accessed 05.08.15.
- [3] Khalilian, H., Ghasemi-Vernamkhasti, M., Naderi-Boldaji, M., Rostami, S. (2017). Developing and testing a cylindrical dielectric sensor for measuring sugar concentration of sugar beet syrup. *Iranian J. Biosystems Eng.* (Accepted manuscript).
- [4] 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. *J. Sens. Actuators, A*, 247, 289-297.
- [5] Garcia, A., Torres, J. L., De Blas, M., De Francisco, A., Illanes, R. (2004). Dielectric characteristics of grape juice and wine. *J. Biosystems Eng.*, 88, 343-349.
- [6] Tanaka, F., Uchino, T., Hamanaka, D., Gregory-Atungulu, G., Hung, Y. (2008). Dielectric properties of

- (2012). Dielectric spectroscopy in agrophysics. *J. Int Agrophysics*, 26, 187-197.
- [23] Guo, W., Fang, L., Liu, D., Wang, Zh. (2015). Determination of soluble solids content and firmness of pears during ripening by using dielectric spectroscopy. *J. Comput. Electron. Agric.*, 117, 226-233.
- [24] Guo, W., Liu, Y., Zhu, X., Wang, Sh. (2011). Dielectric properties of honey adulterated with sucrose syrup. *J. Food Eng.*, 107, 1-7.
- [25] Guo, W., Nelson, S. O., Trabelsi, S., Kays, S. J. (2007). Dielectric properties of honeydew melons and correlation with quality. *J. Microwave Power*, 41, 44-54.
- [26] Guo, W., Zhu, X., Nelson, S. O. (2010). Permittivities of watermelon pulp and juice and correlation with quality indicators. *J. Food Prop.*, 16, 475-484.
- [27] حیاتی، ع.؛ رئوفی، م.ح.؛ کامگار، س. (1392) امکان‌سنجی استفاده از ویژگی‌های خازنی در تشخیص میزان قند سیب. هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی ماشین‌های کشاورزی (بیوسیستم) و مکانیزاسیون، مشهد، ص 816-801.
- [28] Tulasidas, T. N., Raghavan, G. S. V., van-de-Voort, F., Girard, R. (1995). Dielectric properties of grapes and sugar solutions at 2.45 GHz. *J. Microwave Power*, 30, 117-123.
- [29] Zhu, X., Guo, W., Wu, X. (2012). Frequency and temperature dependent dielectric properties of fruit juices associated with pasteurization by dielectric heating. *J. Food Eng.*, 109, 258-266.
- [30] Kudra, T., Raghavan, G. S. V., Akyel, C., Bosisio, R., van-de-Voort, F. R. (1992). Electromagnetic properties of milk and its constituents at 2.45 MHz. *Int Microwave Power Inst. J.*, 27, 199-204.
- [31] White, F. M. (2011) *Fluid Mechanics*. Oxford, United Kingdom, Blackwell's publishing.
- شماره 2، ص 97-104.
- [12] Naderi-Boldaji, M., Fazeliyan-Dehkordi, M., Mirrezi, S. A., Ghasemi-Vernamkhashti, M. (2015). Dielectric power spectroscopy as a potential technique for the non-destructive measurement of sugar concentration in sugarcane. *J. Biosystems Eng.*, 140, 1-10.
- [13] Hoog, N. A., Olthuis, W., Mayer, M. J. J., Yntema, D., Miedema, H., van-den-Berg, A. (2012). On-line fingerprinting of fluids using coaxial stub resonator technology. *J. Sens. Actuators, B: Chem.*, 163, 90-96.
- [14] Hoog, N. A. Stub resonators transmission line based water sensors. Ph. D. dissertation. University of Twente, 2014.
- [15] Alharthi, A., Lange, J., Whitaker, E. (1985). Immiscible fluid flow in porous media: Dielectric properties. *J. Contaminant Hydrology*, 1, 107-118.
- [16] Angkawisittpan, N., Manasri, T. (2012). Determination of sugar content in sugar solutions using interdigital capacitor sensor. *J. Meas. Sci. Rev.*, 12, 8-13.
- [17] De-Whalley, H. C. S. (1965) *ICUMSA Methods Book*. Elsevier, Amsterdam.
- [18] Bionutrient Food Association. Brix, 2015 URL <https://bionutrient.org/bionutrient-rich-food/brix>. Accessed 17.02.16.
- [19] Havinga, E. E. (1961). The temperature dependence of dielectric constants. *J. Phys. Chem. Solids*, 18, 253-255.
- [20] Malmberg, C. G., Maryott, A. A. (1956). Dielectric constant of water from 0 to 100 degree celsius. *J. the int Bureau Standards*, 2641, 1-8.
- [21] Venkatesh, M. S., Raghavan, G. S. V. (2004). An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials. *J. Biosystems Eng.*, 88, 1-18.
- [22] Skierucha, W., Wilczek, A., Szyplowska, A.