

توسعه و ارزیابی حسگر خازنی اندازه‌گیر رطوبت بسته‌های علوفه در بیلر

نادیا دلاورپور^{۱*} و محمد لغوی^۲

چکیده

رطوبت یکی از عوامل‌های مهم در محصول یونجه هنگام برداشت و پس از آن است. میزان رطوبت یونجه تأثیر زیادی بر مراحل مختلف برداشت و پس از برداشت مانند بسته‌بندی حمل و نقل، انبارداری و غیره دارد و نقش آن در عملکرد محصول بسیار مشهود است. روش معمول اندازه‌گیری رطوبت علوفه روش وزنی است که وقت‌گیر و هزینه‌بر بوده، همچنین از جمله روش‌های مخرب است. در این پژوهش، یک حسگر خازنی برای اندازه‌گیری رطوبت بسته‌های علوفه به‌صورت بی‌درنگ و پیوسته، طراحی، ساخته و ارزیابی شد. پایه و اساس کار بر این مبنا است که با ارسال یک فرکانس مشخص، تغییر ظرفیت را به ازای قرار گرفتن دی‌الکتریک (در اینجا مقصود همان بسته‌های علوفه است) در بین صفحات اندازه‌گیری کرده و سپس با تحلیل داده‌ها رابطه بین محتوای رطوبت و تغییر ظرفیت خروجی به دست خواهد آمد. در ارزیابی آزمایشگاهی از علوفه تهیه شده از مزرعه یونجه در دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز در سه سطح رطوبتی، در سه سطح جرم مخصوص و پنج سطح فاصله صفحات حسگر خازنی استفاده شد. نتایج آزمون‌ها نشان دادند که رابطه معنی‌داری بین محتوای رطوبتی و ظرفیت خروجی حسگر وجود دارد. با افزایش رطوبت و جرم مخصوص میزان ظرفیت خازنی افزایش می‌یابد در حالیکه با افزایش فاصله صفحات خازن ظرفیت خازنی کاهش می‌یابد. همچنین دما اثر معنی‌داری بر میزان خروجی حسگر دارد.

واژه‌های کلیدی: اندازه‌گیری بی‌درنگ، حسگر خازنی، کشاورزی دقیق، محتوای رطوبتی، یونجه.

ارجاع: دلاورپور ن. و لغوی م. ۱۳۹۲. توسعه و ارزیابی حسگر خازنی اندازه‌گیر رطوبت بسته‌های علوفه در بیلر. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۳۷-۴۵ (۳): ۲.

۱- کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شیراز.

۲- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شیراز.

* نویسنده مسئول: nadia.delavarpour@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۲/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۰۴

مقدمه

یکی از بزرگ‌ترین معضلات در خصوص علوفه برداشت شده، لزوم کاهش رطوبت از میزان اولیه حدود ۸۰ درصد به حد ۲۰ درصد (براساس وزن تر) است. حد ۲۰ درصد رطوبتی است که برای انبار کردن و بسته‌بندی علوفه مناسب بوده و باعث تخمیر و فساد آن نمی‌شود (ساوویی و همکاران، ۲۰۰۲). بیشتر دستگاه‌های موجود برای اندازه‌گیری رطوبت محصولات کشاورزی به‌صورت ایستگاهی و با نیروی انسانی قابل استفاده است. با پررنگ شدن نقش و اهمیت کشاورزی دقیق و همچنین بحث مدیریت مزرعه، لزوم وجود ابزارهای اندازه‌گیری بسته‌های علوفه به طور پیوسته و همزمان با حرکت دستگاه در مزرعه و تصمیم‌گیری در زمینه‌های مختلف مدیریت مزرعه مهم است. پس در این پژوهش سعی بر آن بود تا ابزار مناسبی برای اندازه‌گیری رطوبت بسته علوفه به طور پیوسته و همزمان با حرکت، طراحی و ساخته شود. در این راستا به صرفه اقتصادی دستگاه و همچنین کم هزینه بودن آن توجه شد.

رطوبت علوفه به دوروش مستقیم و غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌شود. در روش مستقیم، جرم مشخصی از علوفه در مدت زمان و دمای مشخص در آن قرار گرفته و پس از گذشت مدت زمان مشخص توزین نمونه‌ها دوباره انجام شده و رطوبت نمونه‌ها به دست می‌آید. روش استاندارد با ASABE برای سنجش محتوای رطوبتی محصولات از طریق روش آن ارائه شده است که طی آن محصولات مختلف در دما و برای مدت زمان‌های مشخص در آن باقی می‌مانند. برای یونجه و علوفه باید نمونه‌های ۳۰ گرمی به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۳ درجه سلسیوس در داخل آن قرار داده شود تا رطوبت اضافی آن حذف شده و با توجه به وزن اولیه (W_1) و ثانویه (W_2) رطوبت محصول به دست آید (ASABE, 2010). میزان رطوبت، به‌صورت نسبت مقدار رطوبت در محصول به وزن مرطوب آن از رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$M_{(w.b)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

این روش‌ها با این که کاربرد بیشتری نسبت به روش‌های غیرمستقیم دارند اما بسیار وقت‌گیر بوده و نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی دارد. پس ترجیح داده می‌شود که از روش‌هایی استفاده شود که اندازه‌گیری رطوبت را در مزرعه انجام می‌دهند (زازوتا و اکسین، ۲۰۰۵).

روش‌های غیرمستقیم به طور معمول بر پایه اندازه‌گیری خصوصیتی از ماده هستند که با محتوای رطوبتی رابطه قوی دارد. روش‌های اندازه‌گیری رطوبت به‌صورت پیوسته عبارتند از: روش مقاومتی^۱، روش خازنی^۲، روش صوتی^۳، روش امواج نزدیک مادون قرمز^۴، روش رزونانس مغناطیسی هسته^۵ و روش میکروویو^۶. مهم‌ترین و متداول‌ترین روش برای سنجش رطوبت، بر مبنای اندازه‌گیری خاصیت خازنی یا دی‌الکتریک محصولات پایه‌ریزی شده است که این خاصیت علاوه بر نوع ماده با رطوبت آن نیز تغییر می‌کند. ثابت دی‌الکتریک یک ماده توانایی آن ماده برای ذخیره انرژی الکتریکی است. با تغییر سه عامل می‌توان ظرفیت یک خازن را تغییر داد: فاصله صفحات، مساحت صفحات و نوع ماده دی‌الکتریک. بنابراین رطوبت‌سنج‌های نوع خازنی قابلیت اندازه‌گیری محتوای رطوبتی مواد را دارد. چرا که با تغییر رطوبت محصولات، ضریب دی‌الکتریک آن به طور معنی‌داری تغییر می‌کند. پژوهش‌هایی در زمینه اندازه‌گیری رطوبت محصولات کشاورزی و خواص دی‌الکتریک آن‌ها با حسگرهای نوع خازنی انجام شده است.

ایوبنکس و بیرل (۲۰۰۱) محتوای رطوبتی یونجه را با استفاده از خازن صفحه موازی اندازه گرفتند. آن‌ها دریافتند که مقدار علوفه یونجه قرار داده شده بین صفحات اثری بر میزان رطوبت ینی شده ندارد، اما لازم بود که این روش برای هر محصول به طور جداگانه واسنجی شود. عثمان و همکاران (۲۰۰۲) یک خازن صفحات موازی با قابلیت تغییر فاصله صفحات، برای اندازه‌گیری رطوبت علوفه و یونجه ساختند. یک تایمر جریان پیوسته (LM555) در هر صفحه خازن استفاده شد که به‌عنوان خازن بیرونی عمل می‌کرد. تایمر به‌عنوان یک مالتی ویراتور ناپایدار^۷ (ایجاد موج مربعی یا سیگنال مربعی ماست و فرکانس وابسته به عناصر مدار است) کار می‌کرد. خروجی حسگر به‌صورت اختلاف بین فرکانس خروجی خازن وقتی که هیچ ماده‌ایی بین صفحات آن وجود نداشت (833 KHz) و فرکانس خروجی واقعی

1- Resistance-method

2- Capacitance-method

3- Sonic-method

4- Near-infrared radiation method

5- Nuclear magnetic resonance method

6- Microwave method

7- Unstable multi vibrator

کننده میزان جرم مخصوص مناسب جهت بسته‌بندی آن‌ها بوده و از آنجا که تراکم‌پذیری بسته‌های یونجه به محتوای رطوبتی، بلوغ و چین برداشت آن زیاد وابسته است لازم است تراکم بسته‌ها متناسب با محتوای رطوبتی محصول با راننده به طور دایم کنترل شود. همچنین رطوبت در تعیین میزان جرم مخصوص مطلوب حین بسته‌بندی، برای کمینه کردن نیروی لازم پلانجر، نیز نقش مهمی دارد. حد رطوبتی ۲۰ درصد برای انبار کردن و بسته‌بندی علوفه مناسب بوده و باعث تخمیر و فساد آن نمی‌شود. پس در این پژوهش تلاش بر آن بود تا دستگاه مناسبی برای اندازه‌گیری رطوبت بسته علوفه به طور پیوسته و همزمان با حرکت، طراحی و ساخته شود. در این راستا به صرفه اقتصادی دستگاه و همچنین کم هزینه بودن آن نیز توجه شد.

مواد و روش‌ها

رابطه کلی که بر خازن و حسگرهای خازنی حاکم است عبارت است از:

$$C = \epsilon \cdot k \frac{A}{d} \quad (2)$$

که در آن، C ظرفیت خازن (f)، A سطح مؤثر خازن (m^2)، d فاصله صفحات (m)، k ثابت دی‌الکتریک و $\epsilon = 8.854 \times 10^{-12}$ قابلیت گذردهی خلاء است. البته این رابطه به شرطی صحیح خواهد بود که از نظر عددی $d \ll A$ باشد (عثمان و همکاران، ۲۰۰۲).

طراحی و ساخت حسگر خازنی

اولین و مهم‌ترین قسمت ساخت حسگر اندازه‌گیری رطوبت خازنی، انتخاب ابعاد و ماده تشکیل دهنده صفحات خازن است. تیغه‌های خازن باید از جنس فلز باشند تا رسانای خوبی برای جریان الکتریسیته باشند. چون حسگر در تماس با علوفه است فلز مورد نظر باید ضد زنگ و تا حدودی مقاوم به سایش باشد. مطالعات قبلی نشان داده است که خروجی حسگر خازنی اندازه‌گیری رطوبت علاوه بر تغییرات رطوبت به تغییرات هدایت الکتریکی نیز بستگی دارد. رطوبت موجود در نمونه‌ها باعث رسانا شدن دی‌الکتریک خازن (برقراری جریان بین صفحات خازن) می‌شود. برای به حداقل رساندن اثر هدایت الکتریکی بر خروجی حسگر، باید صفحات خازن با یک ماده عایق پوشانده شود (حنیفی، ۱۳۸۸). برای طراحی کاوشگر

(وقتی علوفه در بین صفحات قرار داشت) در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که این حسگر نمی‌تواند به صورت مستقیم میزان رطوبت را مشخص کند، با این وجود رابطه خوبی بین خروجی حسگر و میزان رطوبت موجود در حجم خازن دیده شد. افت فرکانس با محتوای آب در رطوبت‌های پایین رابطه قوی‌تری نسبت به رطوبت‌های بالا داشتند.

رای و همکاران (۲۰۰۵) دستگاه رطوبت‌سنجی ساختند که محتوای رطوبتی محصول را به صورت مستقیم (بدون استفاده از نمودار یا جدول خاصی) بر روی یک نمایشگر (LCD) نمایش می‌داد. حسگر خازنی این دستگاه از دو صفحه آلومینیومی به ابعاد 16×14.5 cm که به فاصله 3cm از هم به صورت موازی و در داخل یک محفظه پلاستیکی^۱ قرار گرفته بودند، تشکیل شده بود. مدار الکترونیکی در این پژوهش دارای یک نوسان ساز^۲ موج مربعی بود، که در فرکانس بالا (2 MHz) کار می‌کرد. این نوسان‌ساز برای تغذیه حسگر خازنی به کار برده شده و خروجی آن به یک مدار تقویت سیگنال فرستاده می‌شود (مدار تقویت سیگنال از یک آمپلی‌فایر همانند IC 7661 که خروجی را دو برابر می‌کرد تشکیل شده بود). در ادامه پالس تقویت شده به یک مدار RC (مدار بر پایه یک خازن و یک مقاومت) فرستاده می‌شد که ولتاژ DC (مستقیم) را به نسبت رطوبت‌های مختلف نشان می‌داد. وی در این پژوهش محصولات گندم، جو، سویا، آفتاب‌گردان و خردل را بررسی کرد.

مک‌ایننتاش و کاسادا (۲۰۰۸) حسگر دیگری برای اندازه‌گیری محتوای رطوبتی محصولات کشاورزی طراحی کردند. این حسگر به شکل یک میله بود که برای اندازه‌گیری رطوبت وارد توده محصولات کشاورزی می‌شد. این حسگر از سه خازن تشکیل شده که برای اندازه‌گیری رطوبت از میدان که روی خازن تشکیل شده (میدان موضعی) استفاده می‌شد.

اطلاع از میزان رطوبت بسته‌ها هنگام بسته‌بندی و برای مرحله‌های بعد از آن که شامل مرحله انبارداری نیز می‌شود ضروری است. هدف از تعیین رطوبت علوفه هنگام بسته‌بندی بالا بردن قدرت تصمیم‌گیری در رابطه با ادامه دادن عملیات بسته‌بندی است. رطوبت علوفه عامل تعیین

1- Acrylic container
2- Square wave oscillator

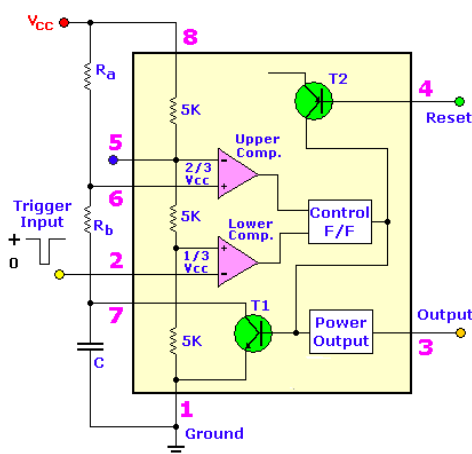
ازای قرارگیری علوفه با شرایط متفاوت در بین صفحات خازن استفاده شد.

ساخت مدار الکترونیکی

برای ساخت مدار الکترونیکی از یک IC555 برای تولید موج مربعی استفاده شد. رابطه ۳، رابطه‌ای است که برای اندازه‌گیری ظرفیت خازنی به کار برده شد. این رابطه هنگامی که از مدار LM555 برای ایجاد خاصیت خازنی در صفحات یک خازن استفاده شود کاربردی است (عثمان و همکاران، ۲۰۰۲).

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1.44}{(R_A + 2R_B)C_{Hay}} \quad (3)$$

که در این رابطه T بازه زمانی، f فرکانس خروجی ولتاژ، R_A و R_B مقاومت‌های به کار رفته در مدار که به ترتیب برابر $\frac{4}{3}$ و $\frac{16}{4}$ کیلو اهم است و C_{Hay} ظرفیت خازنی متغیر (به ازای قرارگیری مواد با شرایط مختلف در میان صفحات) هستند. به این ترتیب آزمایش‌ها با مدار جریان پیوسته LM555 انجام شد. تصویری از مدار LM555 در شکل ۲ آورده شده است. در این مدار تایمر به عنوان یک مالتی ویراتور ناپایدار عمل می‌کرد. فرکانس آزاد و فرکانس‌های کاری با دو مقاومت بیرونی (R_B و R_A) و یک خازن متغیر (C_{HAY}) کنترل می‌شدند. حسگر رطوبت سنج در فرکانس پایه 100 KHz کار می‌کرد.



شکل ۲- مدار جریان پیوسته LM555

حسگر دمای مورد استفاده در این پژوهش حسگر دما و رطوبتی SHT10 از خانواده حسگرهای SHT1x است که استفاده شد با یک سیم در ارتباط با مدار بود و به صورت آزاد در محیط قرار می‌گرفت دمای محیط را اندازه‌گیری می‌کرد. در شکل ۳ تصویری از حسگر دما و نحوه قرار آن در محیط نشان داده شده است.

رطوبت بسته‌های علوفه بر پایه اصول اولیه خازن‌ها، نیاز به دو الکتروود فلزی به عنوان صفحات خازن است که علوفه در بین این دو صفحه قرار گرفته و نقش دی‌الکتریک را انجام دهد. در این پژوهش از صفحه‌های آلومینیومی با ضخامت 1mm با ابعاد صفحات 50×50 سانتی‌متر انتخاب شد. عایق انتخاب شده در این پژوهش روکش‌های تفلونی است. برای ایجاد پایه نگارنده‌ای برای الکتروودهای خازن، انجام آزمون‌ها در فاصله‌های مختلف و همچنین برای ایجاد شرایط بسته‌های تشکیل شده علوفه در آزمایشگاه، یک محفظه با ابعاد $50 \times 50 \times 50$ سانتی‌متر ساخته شد که شرایط دانسیته‌های بسته‌ها در مزرعه را در آزمایشگاه فراهم می‌کرد. برای فشردن بسته‌ها به مقادیر مورد نظر، وزن مشخصی از علوفه را به صورت لایه‌لایه و دستی در محفظه قرار داده و با یک پلانجر فشردن‌سازی انجام شد بنابراین تلاش شد که تراکم علوفه در جرم مخصوص‌ها و فواصل مختلف به صورت یکسان توزیع شود. برای شبیه سازی موقعیت بسته‌های مزرعه در حسگر ساخته شده، نمونه‌های علوفه به صورت سالم و خرد نشده استفاده شدند. برای ایجاد فواصل مختلف، ناودانی‌های آلومینیومی در فاصله‌های ۵۰، ۴۰، ۳۰، ۲۰ و ۱۰ سانتی‌متر در دو وجه روبرویی محفظه ساخته شده، نصب شد. در شکل ۱ نیز تصویری از محفظه ساخته شده آمده است



شکل ۱- نحوه نصب ناودانی‌ها در محفظه و قرارگیری صفحات خازن

در این پژوهش از علوفه یونجه برای بررسی رابطه ظرفیت خازنی با محتوای رطوبتی و دما استفاده شد. نمونه‌ها از مزرعه یونجه در دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز تهیه شدند. رطوبت واقعی نمونه‌ها با استفاده از استاندارد ASABE S3558.2 همان‌گونه که اشاره شد (رابطه ۱) به دست آمد. در این پژوهش برای اندازه‌گیری پیوسته رطوبت بسته‌های علوفه از تغییرات ظرفیت ایجاد شده به

بنابراین محدوده انتخابی برای این پژوهش رطوبت‌هایی در این بازه بوده است. جرم مخصوص از عامل‌های مؤثر در تغییرات ظرفیت خازنی است (عثمان و همکاران، ۲۰۰۲؛ فلسون، ۱۹۸۲ و کاندالا و ساندارام، ۲۰۱۰). جرم مخصوص متداول بسته‌های تهیه شده با ماشین بسته‌بند در مزرعه برابر $100-130 \text{ kg m}^{-3}$ است. بنابراین برای بررسی اثر آن سه سطح در نظر گرفته شد که شامل بازه مورد نظر باشد.

برای آزمون و ارزیابی حسگر رطوبت ساخته شده، آزمایش‌ها در شرایط آزمایشگاهی در دمای ثابت انجام شد. علوفه‌ها در سه سطح رطوبتی ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ بر پایه وزن تر و در پنج سطح فاصله ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر و سه سطح جرم مخصوص ۸۰، ۱۰۰ و ۱۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب تهیه شدند. همچنین برای هر تیمار ۳ تکرار پیش‌بینی شد که در مجموع ۱۳۵ آزمون انجام شد.

با معلوم بودن جرم مخصوص در هر فاصله و همچنین حجم محفظه در فاصله‌های مختلف جرم‌های لازم برای به دست آوردن جرم مخصوص مورد نیاز در حجم مشخص به دست آمد.

نتایج و بحث

اختلاف ظرفیت ایجاد شده به ازای قرارگیری نمونه‌ها با شرایط متفاوت اندازه‌گیری شد. پس از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نمودارهای زیر بین داده‌های ثبت شده حاصل شد. همان طور که در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ دیده می‌شود با افزایش فاصله میزان ظرفیت خازن در هر سه رطوبت ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ کاهش می‌یابد.

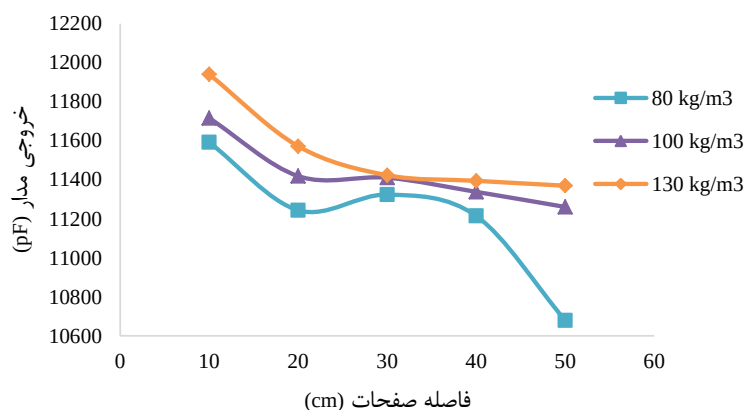
از یک میکروکنترلر Arduino 2560 برای پردازش داده‌های حاصل از حسگر دما و IC555 استفاده شد. نتایج حاصل از تغییرات ظرفیت خازن و دما بر یک LCD کاراکتری ۱۶ پایه نمایش داده می‌شد. نرم‌افزار جمع‌آوری داده‌ها Lab VIEW برای ثبت داده‌های افت فرکانس با توجه به فرکانس خروجی دستگاه وقتی که مواد در بین از یک میکروکنترلر Arduino 2560 برای پردازش داده‌های حاصل از حسگر دما و IC555 استفاده شد. نتایج حاصل از تغییرات ظرفیت خازن و دما بر یک LCD کاراکتری ۱۶ پایه نمایش داده می‌شد. نرم‌افزار جمع‌آوری از رابطه ۳ فرکانس‌های خوانده شده به ظرفیت خازنی تبدیل می‌شدند. قرائت داده‌های مربوطه چیزی در حدود 0.5 s به طول می‌کشید.



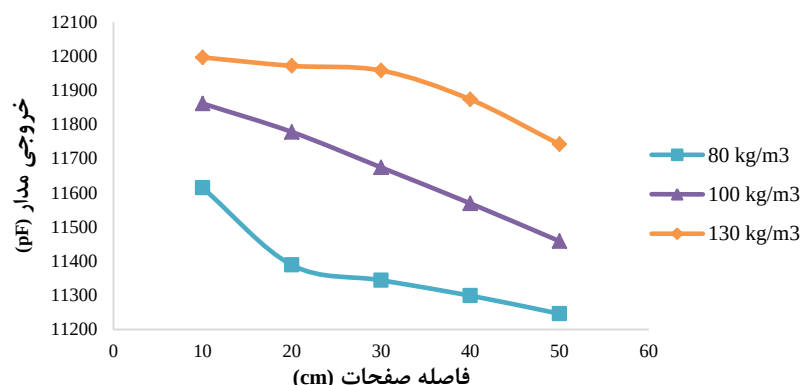
شکل ۳- حسگر دمای مورد استفاده در این پژوهش

آزمون حسگر رطوبت

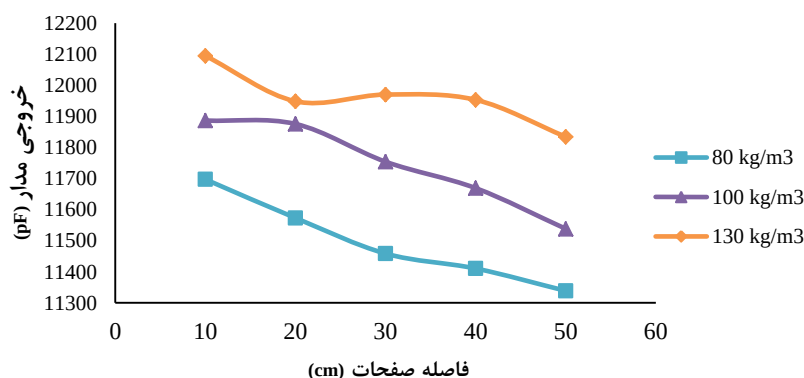
نمونه‌های برداشت شده در ابتدا دارای رطوبت بسیار زیادی بودند. با رها شدن در مزرعه به مدت سه روز رطوبت آن‌ها به حدود ۳۰٪ رسید بعد از آن برای انجام آزمایش‌ها در رطوبت‌های بعدی، علوفه به مدت یک روز در فضای آزمایشگاه رها شده تا به رطوبت بعدی مورد نیاز برسند. این کار تا رسیدن علوفه به رطوبت ۱۰٪ انجام شد. رطوبت مناسب برای بسته‌بندی علوفه ۲۰٪-۱۰٪ است.



شکل ۴- اثر فاصله بر خروجی مدار IC555 در آزمایشگاه برای رطوبت ۱۰٪ در دمای ۲۵ °C



شکل ۵- اثر فاصله بر خروجی مدار IC555 در آزمایشگاه برای رطوبت ۲۰٪ در دمای ۲۵ °C



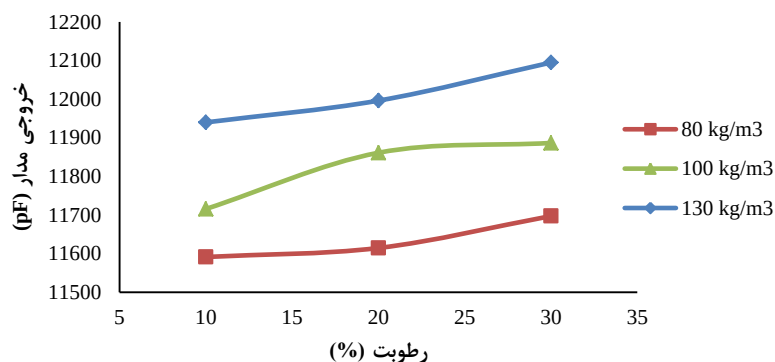
شکل ۶- اثر فاصله بر خروجی مدار IC555 در آزمایشگاه برای رطوبت ۳۰٪ در دمای ۲۵ °C

محیط انجام شده و دما ثابت فرض می‌شده و یا اثر دمای محیط در آن‌ها نیز بررسی می‌شد. بر طبق مطالعات وانگ و همکاران (۲۰۱۲) به ازای یک رطوبت ثابت با افزایش دما، ظرفیت خازنی کاهش می‌یابد. در این پژوهش محصول مورد آزمایش برگ بوته‌های مختلف از جمله ذرت، سورگوم، لوبیا، لوبیا سفید و گل آفتاب‌گردان بود. بسا و همکاران (۲۰۱۳) دریافتند که در نمونه‌های سوپا با افزایش دما در نمونه‌های با رطوبت ثابت، ظرفیت خازنی زیاد می‌شد. در این پژوهش براساس تحلیل‌های انجام شده خروجی مدار LM555 با افزایش دما میزان ظرفیت خازنی در هر رطوبت مشخصی کاهش می‌یابد. در این مدار (LM555) در تمامی دماها با افزایش رطوبت میزان ظرفیت خازنی افزایش می‌یابد، بنابراین با توجه به بررسی‌های انجام شده دمای محیط اثر معنی‌داری بر ظرفیت خازنی داشته و با افزایش دما ظرفیت خازنی کاهش می‌یابد.

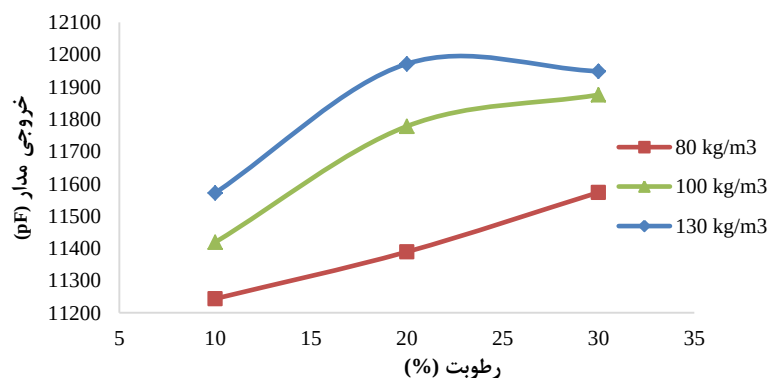
بر طبق یافته‌های پژوهش‌های قبل با افزایش رطوبت نمونه‌های قرار گرفته در بین صفحات خازن، ظرفیت خازنی افزایش می‌یابد (عثمان و همکاران، ۲۰۰۲؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۳ و بسا و همکاران، ۲۰۱۳). عثمان و همکاران (۲۰۰۲) دریافتند که با افزایش محتوای رطوبت افت فرکانس کم می‌شود و با توجه به رابطه معکوسی که بین ظرفیت خازنی و فرکانس (رابطه ۳) وجود دارد با افزایش رطوبت ظرفیت خازنی زیاد می‌شود. در شکل‌های ۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ اثر تغییرات رطوبت بر ظرفیت خروجی خازن مشاهده می‌شود. با افزایش رطوبت میزان ظرفیت حسگر خازنی افزایش می‌یابد.

اثر جرم مخصوص بر تغییرات ظرفیت خازن در فاصله‌های مختلف صفحات خازن بررسی شد. دیده شد با افزایش جرم مخصوص میزان خروجی حسگر ساخته شده افزایش می‌یابد. نمودارهای مربوط به تغییرات جرم مخصوص در فاصله‌های مختلف فاصله بین الکترودهای خازن در شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ آورده شده است.

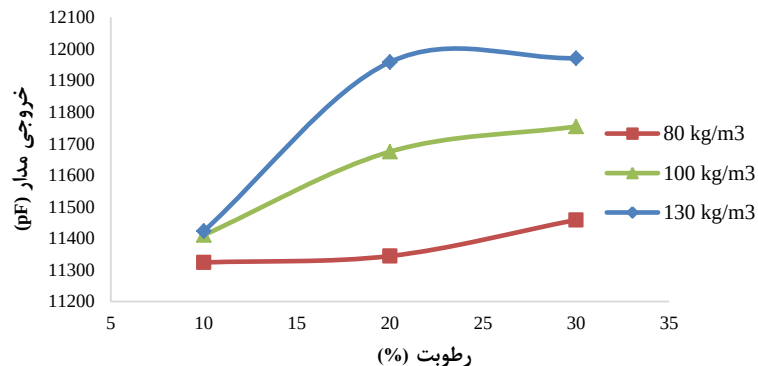
اثر متقابل دما و محتوای رطوبت پارامتر بر یکدیگر بررسی شد. در بقیه پژوهش‌های قبل، آزمایش‌ها یا در دمای



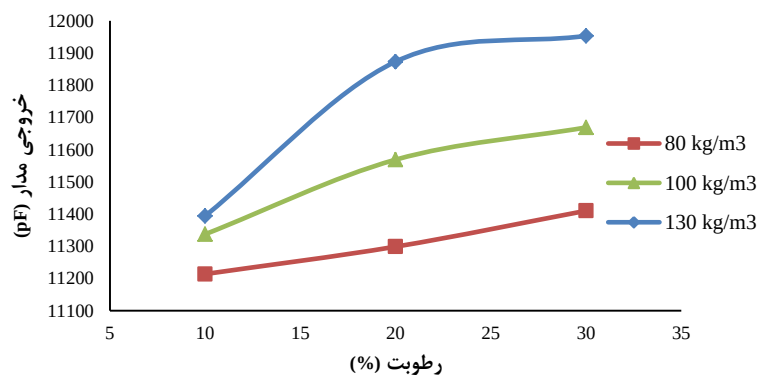
شکل ۷- اثر رطوبت بر خروجی مدار در آزمایشگاه در فاصله ۱۰ cm در دمای ۲۵°C



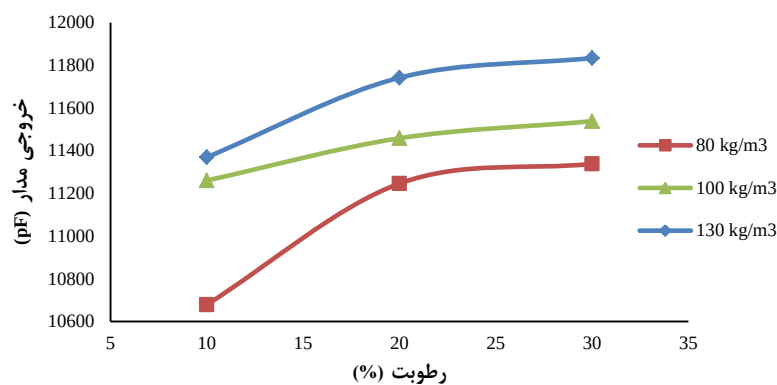
شکل ۸- اثر رطوبت بر خروجی مدار در آزمایشگاه در فاصله ۲۰ cm در دمای ۲۵°C



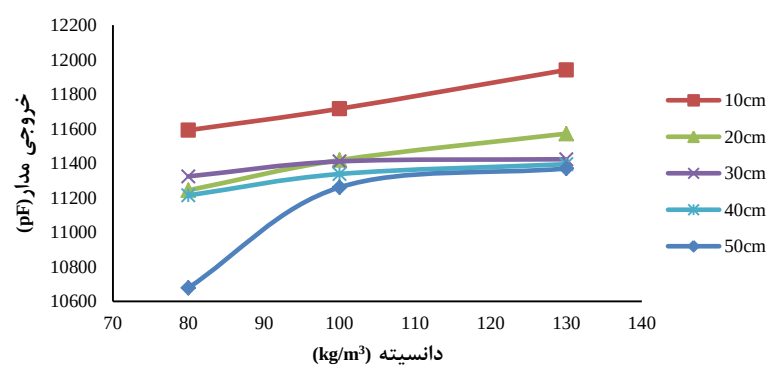
شکل ۹- اثر رطوبت بر خروجی مدار در آزمایشگاه در فاصله ۳۰ cm در دمای ۲۵°C



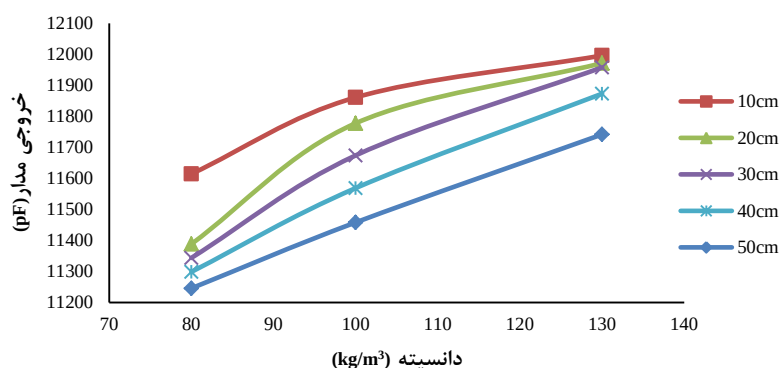
شکل ۱۰- اثر رطوبت بر خروجی مدار در آزمایشگاه در فاصله ۴۰ cm در دمای ۲۵°C



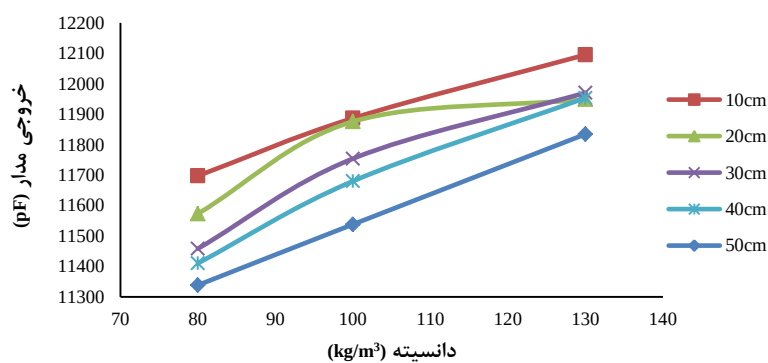
شکل ۱۱- اثر رطوبت بر خروجی مدار در آزمایشگاه در فاصله ۵۰ cm در دمای ۲۵ °C



شکل ۱۲- اثر جرم مخصوص بر خروجی مدار در آزمایشگاه برای رطوبت ۱۰٪ در دمای ۲۵ °C



شکل ۱۳- اثر جرم مخصوص بر خروجی مدار در آزمایشگاه برای رطوبت ۲۰٪ در دمای ۲۵ °C



شکل ۱۴- اثر جرم مخصوص بر خروجی مدار در آزمایشگاه برای رطوبت ۳۰٪ در دمای ۲۵ °C

نتیجه‌گیری

دما اثر معنی‌داری بر مقدار ظرفیت دارد و با

- افزایش دما مقدار ظرفیت خازن کاهش می‌یابد.
- آزمایش‌ها نشان دادند که با افزایش مقدار رطوبت و مقدار دانسیته بسته یونجه مقدار ظرفیت خازن افزایش یافت.

- نتایج بررسی داده‌ها نشان داد که روش غیرمخرب ظرفیت خازنی به خوبی می‌تواند محتوای رطوبت بسته علوفه یونجه را تخمین بزند.
- تحلیل آماری بر مقادیر ظرفیت خازن نشان داد که

منابع

۱. حنیفی ش. ۱۳۸۸. طراحی ساخت و ارزیابی دستگاه سنجش پیوسته رطوبت دانه در یک خشک کن نیمه‌پیوسته خورشیدی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی. دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز. ۱۰۰ ص.
2. ASABE Standards. 2010. ASABE S358.3. Moisture measurement forages. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
3. Bessa W. S. Ribeiro E. P. Bonfim M. C. Leandro G. V. and Errera M. R. 2013. Analysis of capacitive measurements at low frequencies for moisture content determination in soybeans. Brazilian Journal of Instruction and Control, 1(1): 29-34.
4. Eubanks J. C. and Birrell S. J. 2001. Determining moisture content of hay and forages using multiple frequency parallel plate capacitors. ASAE paper No. 01-1072, ASAE, St. Joseph, Michigan.
5. Kandala C. V. K. Nelson S. O. and Lawrence K. C. 1996. Determining moisture content in small wheat samples by dual frequency RF impedance sensing. Transactions of the ASAE. 39(3): 1185-1188.
6. Kandala C. V. and Sundaram J. 2010. Nondestructive measurement of moisture content using a parallel-plate capacitance sensor for grain and nuts. IEEE Sensors Journal. 10(7): JULY.
7. McIntosh R. B. and Casada M. E. 2008. Fringing field capacitance sensor for measuring the moisture content of agricultural commodities. IEEE Sensors Journal. 8(3): 240-247.
8. Nelson S. O. 1991. Dielectric properties of agricultural products (Measurements and applications). IEEE Transactions on Electrical Institution. 26(5): 845-869.
9. Osman A. M. Savoie P. Grenier D. and Theriault R. 2002. Parallel-plate capacitance moisture sensor for hay and forage. ASAE paper No. 021055, American Society of Association Executives
10. Rai A. K. Kottayi S. and Murty S. N. 2005. A low cost field usable digital grain moisture meter with direct display of moisture. Asian Journal of Science and Technology. 6(1): 97-104.
11. Savoie P. Lemire P. and Theriault R. 2002. Evaluation of five sensors to estimate mass-flow and moisture of grass in a forage harvester. Applied Engineering in Agriculture. 18: 389-397.
12. Wang B. Law M. K. and Bermaki A. 2012. A low-cost capacitive relative humidity sensor for food moisture monitoring application. 4th Asia Symposium on Quality Electronic Design. 95-100.
13. Zazueta F. S. and Xin J. 2005. Soil moisture sensors. Available on the: <http://edis.ifas.ufl.edu/Eh226>. Accessed on 24/01/2006.
14. Zhang H. Liu W. Tan B. and Lu W. 2013. Corn moisture measurement using a capacitive sensor. Journal of Computers. 8(6): 1627-1631.

