

مقاله پژوهشی

توسعه و پیاده‌سازی سامانه پایش دبی جرمی مواد دانه‌ای در یک لوله سقوط با استفاده از حسگر خازنی

سلمان رنجبری^۱، محمدرضا ملکی^{۲*}، فرزاد محمدی^۳، جلال خدائی^۲ و کاوه ملازاده^۲

چکیده

اندازه‌گیری دبی جرمی بذر و کود در لوله سقوط خطی‌کارها یکی از ضروریات برای تشخیص میزان مصرف نهاده است. در پژوهش حاضر یک سامانه‌ی غیرتماسی خازنی برای پایش دبی جرمی مواد دانه‌ای در کارنده‌های بذر و کود اجرا شد. این مجموعه شامل یک سازوکار تغذیه مجهز به موزع غلتکی شیاردار بود و سامانه اندازه‌گیری خازنی در یک لوله سقوط قرار داده شد. این مجموعه روی یک پایه ارتعاشی نصب شد تا شرایط مزرعه را در طول اندازه‌گیری شبیه‌سازی کند. سپس کود سوپرفسفات تریپل در ۵ نرخ جریان جرمی از $3/42 \pm 1/22$ تا $19/3 \pm 0/95$ گرم بر ثانیه، بذر گندم در ۸ نرخ جریان جرمی از $2/55 \pm 0/23$ تا $19/02 \pm 0/86$ گرم بر ثانیه و بذر یونجه در ۷ نرخ جریان جرمی از $0/42 \pm 0/02$ تا $1/6 \pm 0/08$ گرم بر ثانیه، در مدت زمان ۳۰ ثانیه برای هر نرخ در لوله سقوط خطی‌کار در هر دو حالت ایستا و پویا اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که جریان جرمی به طور مؤثر با سیگنال‌های حسگر برای هر سه نوع مواد مورد بررسی همبستگی دارد. با این وجود حسگر خازنی نتوانست تغییرات لحظه‌ای نرخ جریان جرمی در یک نرخ مشخص را متناسب با تغییرات ترازوی رقمی اندازه‌گیری کند. این ناتوانی قابل پیش‌بینی بود، زیرا به ماهیت ترازوی رقمی نسبت داده می‌شود که همیشه با تأخیر اولیه همراه است. همچنین نتایج نشان داد که پایه ارتعاشی روی دقت حسگر تأثیری ندارد.

واژه‌های کلیدی: ابزار دقیق، حسگر، فناوری نرخ متغیر، کارنده‌ها، کشاورزی دقیق.

ارجاع: رنجبری س. ملکی م. ر. محمدی ف. خدائی ج. و ملازاده ک. توسعه و پیاده‌سازی سامانه پایش دبی جرمی مواد دانه‌ای در یک لوله سقوط با استفاده از حسگر خازنی. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۶-۱۱: ۳۰. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2024.14290.656>

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان.

۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان.

۳- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.

* نویسنده مسئول: mrmaleki@uok.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۲

مقدمه

کشاورزی دقیق، دانش اجرای عملیات مزرعه بر پایه‌ی اندازه‌گیری نهاده‌ها است. بر اساس سطح تعریف شده از کشاورزی دقیق، دقت اندازه‌گیری نیز تعیین می‌شود. در حالی‌که اندازه‌گیری برخط سرعت پیشروی تراکتور کار بسیار ساده‌ای است، اعمال کود در مزرعه، کاری است که تحقیقات کشاورزی در ابتدای مسیر آن قرار دارد. در اجرای کشاورزی دقیق، اندازه‌گیری کمیت‌هایی نظیر سرعت پیشروی ادوات (Mouazen *et al.*, 2005; Mohammadi *et al.*, 2022b; Mohammadi *et al.*, 2022c)، رطوبت خاک (Chow *et al.*, 2009; Maleki *et al.*, 2007)، عمق کار ادوات خاک‌ورز (Mouazen *et al.*, 2005; Schule & Koller, 2008)، موقعیت حفاظ خاک روتواتور (Mohammadi *et al.*, 2022b; Mohammadi *et al.*, 2022c)، مقاومت مکانیکی خاک (Adamchuk *et al.*, 2004)، زبری سطح خاک (Riegler-Nurscher *et al.*, 2020; Mohammadi *et al.*, 2022a; Mohammadi *et al.*, 2023a)، اسیدیته خاک (Kuang *et al.*, 2015)، مواد آلی (Mouazen *et al.*, 2005)، مواد معدنی خاک (Maleki *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2012) و بافت خاک (Figueiredo *et al.*, 2017; Bogunovic *et al.*, 2018)، شوری خاک (Ren *et al.*, 2016)، اندازه‌گیری و نمایش مداوم میزان بذر و کود در مخزن کود و بذر (Karimi *et al.*, 2019; Mohammadi *et al.*, 2020) و نیز جریان مواد توده‌ای نظیر کود و یا بذر (Reinke *et al.*, 2011; Mohammadi *et al.*, 2023b) در این راستا مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفته‌اند. از آنجا که در کشاورزی دقیق اعمال نهاده مبتنی بر اندازه‌گیری دقیق خواهد بود، محاسبه جریان جرمی مواد از اهمیت بالایی برخوردار است. بر اساس میزان نیاز بذر و یا کود در نواحی مختلف مزرعه که از قبل مشخص شده، می‌توان با تغییر دبی مواد خروجی ماشین، فناوری کوددهی نرخ متغیر^۱ و یا بذر کاری نرخ متغیر^۲ را به اجرا درآورد. در فناوری نرخ متغیر، سعی بر توزیع میزان نهاده بر اساس نیاز هر نقطه از مزرعه به‌طور جداگانه است (Vrindts *et al.*, 2005).

به‌طور معمول تغییر دبی مواد خروجی ماشین به‌وسیله تغییر نسبت دور موزع به دور چرخ صورت

می‌پذیرد. با وجود این، تغییرات داده شده به منزله تغییر قطعی در نرخ خروج مواد نیست. این امر به دلایلی از جمله نوسانات موجود در کار موزع، خالی شدن مخزن، گرفتگی لوله‌های سقوط^۳ و یا تغییر دبی مواد خروجی در اثر تغییرات رطوبت خصوصاً در کودکارها و کودریزها، ایجاد خواهد شد. بنابراین برای کودریزی به‌طور دقیق مطابق با مقدار تعیین شده و اطمینان از صحت عملکرد ماشین (کودریز) مجهز به سامانه نرخ متغیر در حین کار، می‌بایست حسگرهایی در قسمت خروجی موزع یا لوله سقوط قرار داد تا ضمن اطلاع از عملکرد ماشین، بتوان مقدار صحیح دبی جریان جرمی مواد دانه‌ای را اندازه‌گیری کرد. روش‌های متعددی توسط محققان برای توسعه و تکامل اندازه‌گیری جریان جرمی صورت گرفته است. این روش‌ها به دو دسته تماسی و غیرتماسی تقسیم می‌شوند. در یک دسته‌بندی روش تماسی شامل حسگرهای پیزوالکتریک (Rangbari *et al.*, 2003; Liptak, 2003)، حسگر نیروی ضربه‌ای (Borgelt, 2015; Rangbari *et al.*, 2023)، حسگرهای مبتنی بر نیروی مرکزگرا^۴ (Mohammadi *et al.*, 2023b)، دبی‌سنج مبتنی بر نیروی کوریولیس (Norden, 1998; Marcus & Maletic, 2003; Basu, 2018)، حلزونی حمل‌کننده لولایی (Wagner & Shrock, 1998) و حسگرهای الکترومغناطیسی تماسی (Knepler, 1979) است. روش‌های غیرتماسی باتوجه به اصل اندازه‌گیری روش شامل؛ حسگر فتوبرق (Xia *et al.*, 2011)، حسگر خازنی (Bachman, 1988; Kumhala *et al.*, 2007)، حسگر فراصوتی (Fathauer, 1975; Klemme *et al.*, 1992)، حسگر موج کوتاه (Karimi *et al.*, 2015)، حسگرهای الکترومغناطیسی (Arslan *et al.*, 1980)، حسگر فیبر نوری (Al-Mallahi & Kataoka, 2000)، و حسگر مادون قرمز (Karimi *et al.*, 2017; Besharati *et al.*, 2019) است. حسگرهای غیرتماسی به دلیل غیرتماسی و غیر انسدادی بودن نسبت به حسگرهای تماسی می‌توانند در کاربرد بهتر واقع شوند. اما لازم است که متناسب با هر کاربرد توسعه داده شوند.

3- Tubes lets
4- Centripetal

1- Variable-rate application technology
2- Variable-rate seeding

در یک پژوهش، یک سامانه سنجش جدید مبتنی بر فیبر نوری برای تخمین جریان جرم دانه در خطی کار توسعه داده شد (Al-Mallahi & Kataoka, 2013). در این پژوهش دو حسگر فیبر نوری در دو واحد اندازه‌گیری با غلتک‌های شیار محوری مختلف نصب شد. نتایج ۵۲ آزمایش برای تخمین جریان جرم دانه‌ها نشان داد که در ۹۸ درصد آزمایش‌ها میزان برآورد بیش از ۹۰ درصد بود. علاوه بر این، میزان برآورد کلی ۹۵ درصد بیان شد. با توجه به نتایج این پژوهش می‌توان اظهار داشت که حسگر فیبر نوری برای روش آزمایشگاهی مناسب است و به دلیل کم بودن قطر باریکه نوری نسبت به سایر روش‌ها از حساسیت بالایی برخوردار است، اما به دلیل تجهیزات حجیم و گران قیمت نمی‌تواند بر روی کارنده‌ای که دارای تعداد زیادی لوله سقوط است مورد استفاده قرار گیرد و به این دلیل مناسب روش مزرعه‌ای نخواهد بود.

در یک ثبت اختراع برای اندازه‌گیری جریان جرمی بذر در لوله سقوط از حسگر خازنی استفاده شده بود (Bachman, 1988). این حسگر بر اساس محاسبه تغییرات ظرفیت خازن، در نتیجه عبور بذر از بین صفحات خازن کار می‌کرد. در این ثبت اختراع برای راه‌اندازی حسگر خازنی از ولتاژ متناوب استفاده شد. در این سامانه نوسان‌ساز در محدوده ۵ مگا هرتز پالس‌های برقی تولید می‌کرد که از جنس ولتاژ بودند. در مدار این حسگر برای جداسازی مدار نوسان‌ساز و مبدل از هم، بافر ولتاژ به جریان استفاده شده بود تا در لحظه عبور جریان بذر، تغییرات امپدانس^۴ مبدل با انتقال ناخواسته به نوسان‌ساز، تعداد فرکانس آن را کاهش ندهد. با افزایش جریان بذر در حسگر خازنی به همان نسبت نیز دامنه ولتاژ نوسانی دچار تغییر خواهد شد و این فرایند در مرحله بعد به وسیله‌ی مدولاسیون دامنه^۵ دودمولاتور، به ولتاژ مستقیم تبدیل می‌شود و در نهایت دامنه ولتاژ به وسیله‌ی تقویت‌کننده تقویت می‌گردد. با وجود سامانه پیشنهادی، اطلاعاتی از دقت و ارزیابی این سامانه در دسترس نیست. در پژوهشی دیگر یک حسگر خازنی برای اندازه‌گیری جریان جرم دانه مورد استفاده قرار گرفت (Stafford et al., 1996).

اندازه‌گیری حرکت دانه در ردیف‌کارها به وسیله‌ی شمارش دانه‌های مجزا از یکدیگر با کمک شمارنده‌های بذر به خوبی تجاری شده است (Reid et al., 1976; Singh et al., 2005). با وجود این، اندازه‌گیری جریان جرمی توده کود و یا بذر، با مشکلاتی روبرو است. به علت ابعاد کوچک‌تر، بذرها و کودهای شیمیایی به صورت توده‌ای در لوله‌های کارنده حرکت کرده و پایش آن‌ها بسیار مشکل‌تر خواهد شد.

یک مطالعه به عنوان بخشی از یک پروژه تحقیقاتی گسترده در مورد توسعه یک سامانه نظارت بر عملکرد کاشت بذر، به دنبال ایجاد یک رویکرد عملی برای طراحی مقایسه‌ای روش‌های سنجش غیرتماسی برای تشخیص نرخ جریان بذر صورت گرفته است (Karimi et al., 2017). در این پژوهش روش‌های مقاومتی وابسته به نور (LDR^۱)، مادون قرمز (IR^۲) و دیودهای لیزری (LD^۳) برای مقایسه و بررسی عملکرد، طراحی و ساخته شدند. زمانی که دانه‌ها از جلوی حسگر بذر و نوار پرتوهای نور عبور می‌کردند، سایه آن‌ها روی عناصر گیرنده می‌افتاد و در نتیجه ولتاژ خروجی تغییر می‌کرد. بنابراین، سرعت جریان بذر با بررسی اطلاعات سیگنال مربوط به دانه‌های عبوری تخمین زده می‌شد. نتایج این پژوهش حاکی از یک رابطه خطی قوی (ضریب همبستگی: $r^2=0.87$) بین تغییرات جرم واقعی دانه و ولتاژهای مربوطه واحد سنجش IR بود. با توجه به نتایج این پژوهش، توصیه شده که روش تشخیص IR روش مناسب‌تری برای تخمین دبی جریان بذر است. با این وجود یکی از مشکلات اساسی حسگرهای نوری عدم اندازه‌گیری بخش میانی توده مواد عبوری است. در این صورت، برخی از دانه‌ها در سایه برخی دیگر می‌گذرند. بنابراین، حسگرهای گیرنده قادر به تشخیص دانه‌های اضافی نیستند (Karimi et al., 2017). البته این روش برای دانه شمارها در صورتی که محیط اندازه‌گیری حسگر را نسبت به ورود گرد و غبار ایزوله کنند، می‌تواند مناسب باشد. از طرفی یک مشکل اساسی برای حسگرهای نوری وجود گرد و غبار است، که در بسیاری از مواقع عمل اندازه‌گیری را غیرممکن می‌کند (Yan, 1996).

4- Impedance
5- Amplitude modulation

1- Light dependent resistors
2- Infrared
3- Laser diodes

این پژوهش به تغییرات رطوبت دانه پاسخ داده بود و نسبت به توزیع مواد در داخل دستگاه حساس بود. البته بر اساس نتایج آن‌ها اثر رطوبت را می‌توان با اندازه‌گیری ظرفیت خازنی در دو فرکانس به‌طور گسترده‌ای جبران کرد.

نتایج پژوهش‌های مرتبط با فراصوت، موج کوتاه، حسگر مادون قرمز، دیود لیزری، مقاومت نوری و فیبرنوری برای اندازه‌گیری نرخ بذر و کود، به دلیل تجهیزات و هزینه زیاد نمی‌تواند هم‌زمان بر روی لوله‌های سقوط خطی کار و کودکاری که دارای چندین لوله سقوط است، مورد استفاده قرار گیرد، هم‌چنین حسگر دارای مبدل الکترومغناطیسی به دلیل حساسیت کم به مقدار حجمی بذر و کود، مناسب پژوهش مورد نظر نخواهد بود. باوجود قابلیت زیاد حسگرهای خازنی در اندازه‌گیری دبی جرمی مواد عبوری در لوله سقوط، این روش به صورت محدود مورد استفاده قرار گرفته است. از مزایای فرض شده برای این روش، علاوه بر عدم تأثیر پذیری از گرد و غبار محیط، اندازه‌گیری کامل توده عبوری بدون تأثیر از شکل و الگوی ریزش مواد است، که این می‌تواند برای اندازه‌گیری دبی جرمی در لوله سقوط خطی کارها بسیار کارآمد باشد.

لازم به ذکر است که روش‌های توموگرافی هم برای اندازه‌گیری دبی جرمی جریان‌های چند فازی استفاده می‌شوند، که از جمله این روش‌ها می‌توان به توموگرافی ظرفیت خازنی (ECT^۱) (Hu et al., 2006; Sen et al., 2000)، توموگرافی مقاومت برقی (ERT^۲) (Aw et al., 2014)، توموگرافی مغناطیسی برقی (EMT^۳) (Zhang et al., 2014; Soleimani et al., 2007)، توموگرافی خصوصیات برقی (EPT^۴) (Zhang et al., 2014)، توموگرافی امپدانس برقی (EIT^۵) (Tarabi et al., 2021)، توموگرافی نوری برقی (EOT^۶) (Zheng et al., 2007) و حسگر توموگرافی موج کوتاه (MWT^۷) (Zou et al., 2020) اشاره کرد. اما این روش‌ها برای بازسازی تصویر مقطعی استفاده می‌شود، که ضمن اندازه‌گیری

غلظت جرمی مقطع، نحوه توزیع مواد را هم بررسی می‌کند. به دلیل پیچیدگی و هزینه بالا و فناوری ساخت، این سامانه‌ها مطلوب استفاده در لوله‌های سقوط خطی کارها نیستند.

در اکثر مطالعات راجع به توسعه سامانه پایش جریان جرمی دانه به هنگام کاشت، تمرکز اصلی بر روی تفکیک اندازه بذرهای کوچک از بزرگ بوده است. تلاش برای توسعه یک سامانه پایش جریان جرمی برای دانه‌های کوچک تا همین اواخر نادر بوده است. علاوه بر این، مطالعات قبلی دارای سامانه‌های پایش دقیق با توانایی تشخیص نوع خاصی از دانه‌ها هستند. در حالی که خطی کارهای بذر معمولاً برای کاشت انواع مختلف بذر با ویژگی‌های فیزیکی متفاوت استفاده می‌شوند. هم‌چنین سامانه‌ی پایش جریان جرمی دانه مناسب باید بتواند عبور دانه‌ها را در دبی‌های مختلف اندازه‌گیری کند. در مرحله بعدی، جرم بذرهای تحویلی در یک دوره زمانی خاص باید با پردازش داده‌های به دست آمده از حسگرها برآورد شود. سامانه‌های پایش جریان جرمی دانه برای کاشت باید برای کار با انواع بذر و دانه توسعه و پیاده‌سازی شوند. بنابراین هدف از پژوهش حاضر طراحی و توسعه یک سامانه پایش جریان جرمی بذر عبوری در یک لوله سقوط با استفاده از حسگر خازنی است، که ارزیابی سامانه برای سه نوع مواد دانه‌ای با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مختلف (بذر نسبتاً درشت: گندم، بذر ریز: یونجه و کود شیمیایی: سوپرفسفات تریپل) در دو شرایط مختلف ساکن و ارتعاشی با دبی‌های عبوری مختلف متناسب با عملکرد خطی کارها صورت گرفت. در این پژوهش سامانه ارتعاشی در ارزیابی‌ها متناسب با ارتعاش خطی کارها در زمان عملیات در مزرعه طراحی و تنظیم شد. بنابراین این پژوهش با هدف نهایی توسعه یک سامانه پایش بر عملکرد بذرداری انجام شد، به طوری که یافته‌های این پژوهش مبنایی برای پژوهش‌های بعدی در مورد توسعه یک سامانه پایش جریان بذر در زمان واقعی خواهد بود.

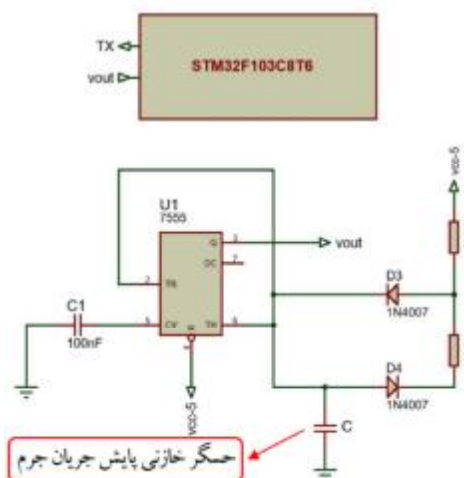
مواد و روش‌ها

طراحی و ساخت حسگر خازنی

در این پژوهش برای اندازه‌گیری جریان جرمی مواد، یک سامانه‌ی مجهز به حسگر خازنی به‌عنوان یک روش غیرتماسی طراحی و ارزیابی شد. اجزای اصلی این سامانه

- 1- Electrical Capacitance Tomography (ECT)
- 2- Electrical Resistance Tomography (ERT)
- 3- Electrical Magnetic Tomography (EMT)
- 4- Electrical Properties Tomography (EPT)
- 5- Electrical Impedance Tomography (EIT)
- 6- Electrical Optical Tomography (EOT)
- 7- Microwave Tomography (MWT)

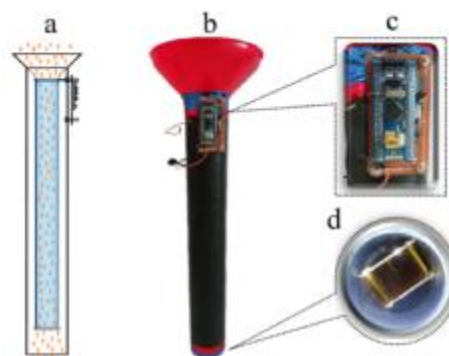
بدین‌ترتیب که مدت زمان صفر یا ۱ بودن پالس‌های خروجی این IC با یک خازن تعیین می‌شود، که همان مدت زمان شارژ و دشارژ شدن خازن به‌وسیله‌ی یک مقاومت است. بنابراین حسگر خازنی پایش جریان جرمی طراحی شده در مدار شکل ۲ بجای خازن C قرار گرفت. مدار ارائه شده یک نوسان‌ساز موج مربعی (اسیلاتور) است این اسیلاتور با توجه به قابلیت IC555 طراحی شده است و به قطعات جانبی کمی نیاز دارد. ولتاژ تغذیه IC555 به صورت ۵ ولت DC از طریق درگاه USB رایانه همراه تأمین شد.



شکل ۲- مدار نوسان‌ساز استفاده شده برای اندازه‌گیری ظرفیت حسگر خازنی.

IC555 به IC555 Timer IC نیز معروف است، در بیشتر مدارها از آن برای ایجاد پالس با فرکانس‌های متفاوت استفاده می‌گردد. این IC را می‌توان در دو وضعیت Monostable و Astable مورد استفاده قرار داد. در حالت Monostable تولید و شکل پالس قابل پایش است، که این پایش عموماً از طریق پایه‌ی ۲ صورت می‌گیرد. اما در حالت Astable در صورت داشتن تغذیه مثبت و منفی در پایه‌های ۱، ۴ و ۸ و اتصال خازن و مقاومت در پایه‌های ۲، ۶ و ۷ به‌طور خودکار و بدون تحریک، پالس‌های ثابت و تعیین شده‌ای را ایجاد می‌کند. پایه‌ی ۳ این IC همواره پایه‌ی خروجی است. در این پروژه از مدار astable استفاده شده است. برای اتصال نوسان‌ساز IC555 به خازن از کابل هم‌محور (Coaxial cable) مدل (RG-58A/U، ساخت کشور تایوان) با مقاومت ظاهری ۷۵ اهم استفاده شد. این کابل‌ها به

شامل: صفحات حسگر خازنی، لوله و اتصالات مربوط به نگهداری صفحات، مدار و برد برق و رایانه همراه به عنوان پردازنده مرکزی است. برای طراحی و ساخت این سامانه، از دو صفحه مسی به ضخامت دو میلی‌متر به عنوان صفحات خازن استفاده شد. انتخاب مس به دلیل عدم اکسید شدن آن در شرایط نامساعد محیطی بود. به‌منظور عایق‌بندی صفحه‌ها به پیچ و سایر اتصالات، از یک لایه پلاستیک عایق استفاده شد. با توجه به فضای محدود داخل لوله سقوط خطی‌کارها، صفحه‌های خازن ۳۵ سانتی‌متر طول، ۳ سانتی‌متر عرض و به فاصله ۲ سانتی‌متر از یک‌دیگر در نظر گرفته شدند. صفحه‌های مسی خازن در داخل لوله UPVC با قطر ۵۰ میلی‌متر و طول ۳۶۰ میلی‌متر قرار گرفتند. به منظور کاهش تأثیرات محیطی از یک محافظ فلزی متصل به زمین که دور تا دور حسگر تعبیه شد، استفاده شد. اطراف محافظ فلزی نیز با چسب نواری مشکی عایق‌کاری شد (شکل ۱).



شکل ۱- (a) طرح‌واره حسگر خازنی، (b) نمای واقعی حسگر خازنی، (c) مدار حسگر و (d) نمای داخلی حسگر خازنی

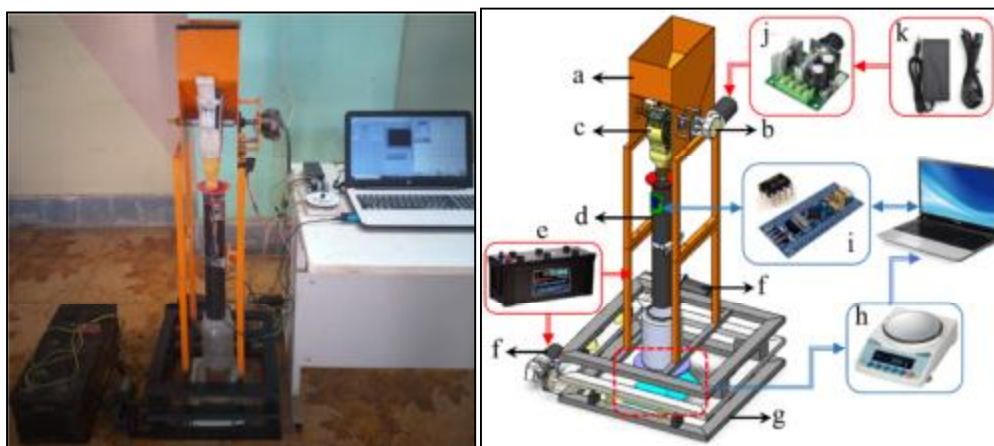
برای اندازه‌گیری دبی جرمی مواد عبوری از اندازه‌گیری مستقیم ظرفیت خازن استفاده نشد، بلکه از این خازن به عنوان یکی از اجزای راه‌انداز IC555 استفاده شد. هرگاه مواد دانه‌ای از میان دو صفحه عبور می‌کنند، باعث ایجاد تغییر در ظرفیت حسگر خازنی می‌شوند و این تغییر به نوبه خود باعث تغییر فرکانس خروجی IC555 می‌شود، که با اندازه‌گیری این فرکانس و واسنجی حسگر، دبی جرمی مواد عبوری قابل اندازه‌گیری است. در شکل ۲ مدار طراحی شده برای حسگر خازنی نشان داده شده است. این مدار به‌صورت یک نوسان‌ساز عمل می‌کند. مقادیر R و C فرکانس نوسان را می‌توانند تعیین کنند.

سامانه ارزیابی حسگر خازنی

برای انجام آزمایش‌های مربوط به واسنجی و ارزیابی حسگر خازنی، یک سامانه آزمایشگاهی مطابق شکل ۳ طراحی و ساخته شد. این سامانه از قسمت‌های مخزن بذر، شاسی اصلی و شاسی حسگر، موزع شیاردار سه ردیفه، لوله سقوط، موتور برقی ۱۲ ولت DC محرک موزع، راه‌انداز پایش دور موتور DC-PWM، مخزن جمع‌آوری بذر، ترازوی رقمی، رایانه همراه، پایه‌ی ارتعاشی بادامکی و منبع‌های تغذیه تشکیل شده است.

منظور ارسال سیگنال‌های رادیویی مورد استفاده قرار می‌گیرند. دلیل انتخاب کابل هم‌محور، جلوگیری از پدیده اغتشاش یا سیگنال ناخواسته است.

در این پروژه از برد STM32f103c8t6 به‌عنوان فرکانس‌متر استفاده شد. میکروکنترلر STM32f103c8t6 از دسته Cortex-M3 است. تغییرات ظرفیت خازن به‌وسیله‌ی میکروکنترلر قرائت شد، سپس با استفاده از کابل USB to TTL و دستورالعمل USART، داده‌ها را به USB رایانه جهت فراخوانی و نمایش در نرم‌افزار LabVIEW 2014 و همچنین ذخیره‌سازی در نرم‌افزار Excel 2013 منتقل می‌کند.



شکل ۳- نمای اصلی و طرح‌واره سامانه ارزیابی حسگر خازنی: (a) مخزن مواد دانه‌ای، (b) موتور برقی راه‌انداز موزع، (c) موزع شیاردار سه ردیفه، (d) حسگر خازنی، (e) باتری ۱۲ ولت، (f) موتورهای برقی سامانه ارتعاشی، (g) پایه سامانه ارتعاشی، (h) ترازوی رقمی مرجع، (i) میکروکنترلر STM32f103c8t6 و IC555، (j) راه‌انداز پایش دور موتور DC-PWM، (k) آداپتور ۱۲ ولت.

واسنجی راه‌انداز از یک انکودر نوری دستی مدل (Tachometer AT-8) استفاده شد.

برای اندازه‌گیری جریان مواد دانه‌ای تخلیه شده از لوله سقوط سامانه از یک ترازوی رقمی با دقت ۰/۰۱ گرم، ظرفیت ۳۲۰۰ گرم، مدل FX-3000-GD-LE ساخت شرکت A&D Company Ltd استفاده شد. داده‌های ترازو به‌وسیله‌ی یک کابل انتقال داده RS232 به رایانه و نرم‌افزار WinCT-FRD Ver. 1.00 جهت ثبت در نرم‌افزار Excel 2013 ارسال شد. از داده‌های ترازو به‌عنوان مرجع ارزیابی حسگر استفاده شد.

به‌منظور ارزیابی سامانه در حالت پویا یک پایه‌ی ارتعاشی برای شبیه‌سازی حرکت خطی‌کار در سطح مزرعه حین اعمال نهاده متناسب با سامانه ارزیابی، طراحی و سپس ساخته شد. پایه‌ی ارتعاشی بر اساس

در این سامانه موزع شیاردار سه ردیفه با محور موزع شش ضلعی به وسیله یک موتور برقی DC با جاروبک^۱ به حرکت در آمد. بیشینه سرعت دورانی موتور ۸۰ دور بر دقیقه بود، که می‌توانست سرعت‌های دورانی مختلف در بازه ۵ الی ۵۵ دور بر دقیقه را برای موزع ایجاد کند. پایش دور موتور به وسیله یک راه‌انداز پایش دور موتور PWM صورت گرفت. ارتباط بین سرعت دورانی موزع، میزان دبی خروجی مواد دانه‌ای، سرعت حرکت معمول خطی‌کارها در مزرعه و در نهایت میزان نهاده مصرفی در هکتار در بخش «ارزیابی حسگر خازنی» آمده است. به‌منظور اندازه‌گیری سرعت چرخش محور موزع و

1- Brushed DC electric motor

(Kabas *et al.*, 2007). جدول ۱ خواص فیزیکی بذرهای گندم، یونجه و کود سوپرفسفات تریپل را نشان می‌دهد. برای به‌دست آوردن رابطه‌ی بین جریان جرمی مواد دانه‌ای و سیگنال خروجی حسگر خازنی، آزمایشی با سه نوع مواد ذکرشده صورت گرفت (جدول ۲). انتخاب جریان‌های جرمی با نرخ‌های مشخص متناسب با سینماتیک سامانه‌ی راه‌انداز موزع و با در نظر گرفتن محدوده سرعت پیشروی معمول کارنده‌ها ۷ کیلومتر در ساعت (Maleki *et al.*, 2008) و فاصله بین ردیف کاشت ۱۷ سانتی‌متر برای گندم و کود سوپرفسفات تریپل و ۱۳ سانتی‌متر برای بذر یونجه (Karimi *et al.*, 2019; Besharati *et al.*, 2019) صورت گرفت. داده‌های جریان جرمی ترازو با فرکانس ۵ هرتز، داده‌های حسگر خازنی با فرکانس ۳۳ هرتز ثبت شدند. مدت زمان داده‌برداری در هر نرخ ریزش ۳۰ ثانیه در نظر گرفته شد. برای دستیابی به رابطه بین جریان جرمی و سیگنال دریافتی از حسگر خازنی، داده‌های خازنی و جریان جرمی ترازو در مدت زمان یک ثانیه به‌صورت جداگانه با هم جمع شدند، تا داده‌ها در واحد زمان یکسان با هم قابل مقایسه و ارزیابی باشند. آزمایش‌ها برای دو حالت ایستا (حالت سکون و غیر فعال بودن پایه ارتعاشی سامانه ارزیابی) و پویا (فعال بودن پایه ارتعاشی سامانه ارزیابی) برای بذرهای گندم و یونجه و کود سوپرفسفات تریپل به‌صورت جداگانه در ۴ تکرار برای ارزیابی حسگر و در ۲ تکرار برای اعتبارسنجی حسگر انجام شدند.

اصول پایه‌ی موجود در منابع علمی و مطابق اندازه‌های لازم، طراحی پایه‌ی ارتعاشی (Maleki *et al.*, 2007) (Boydas & Turgut, 2007; Anthonis *et al.*, 2007) انجام شد. پایه ارتعاشی با استفاده از سازوکار بادامک و دنباله‌کننده مطابق شکل ۳ طراحی و ساخته شد که به وسیله دو موتور برقی DC، دو محور بادامک بالایی و پایینی به حرکت در می‌آمد. محدوده‌های دامنه و فرکانس سامانه ارتعاشی در نرم‌افزار Solidworks 2018 در قسمت Motion Study شبیه‌سازی و تحلیل شد که مقدار فرکانس سامانه ارتعاشی ۵ هرتز با مقادیر بیشینه و کمینه دامنه ارتعاش به ترتیب ۸/۹۹- الی ۸/۹۹+ میلی‌متر بود.

ارزیابی حسگر خازنی

از آنجا که طراحی و ساخت سامانه‌های مجهز به حسگرهای اندازه‌گیری جریان جرمی بذر و کود برای خطی‌کارها و کودکارها مد نظر بود، از بذرهای و کودهای رایج که به‌وسیله‌ی این ماشین‌ها در مزرعه توزیع می‌شوند برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. گندم رقم پیشگام، یونجه رقم همدانی و کود سوپرفسفات تریپل (Triple Superphosphate (TSP) Or $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) به‌عنوان یکی از کودهای دانه‌ای شیمیایی رایج استفاده شد. خواص فیزیکی بذرهای گندم، یونجه و کود سوپرفسفات تریپل طبق استانداردها و منابع اندازه‌گیری شد (ASA, 1994; Mohsenin, 1986; Balasubramanian, 2001; Dursun & Dursun, 2005;

جدول ۱- خواص فیزیکی بذرهای گندم، یونجه و کود سوپرفسفات تریپل

شاخص	گندم	یونجه	کود سوپرفسفات تریپل
طول (mm)	۶/۰۵	۲/۱۵	-
عرض (mm)	۲/۹۹	۱/۰۴	-
ضخامت (mm)	۳/۶۸	۱/۳۵	-
ضریب کرویت	۰/۶۶	۰/۶۷	-
قطر متوسط هندسی (mm)	۴/۰۵	۱/۴۴	-
قطر متوسط حسابی (mm)	۴/۲۴	۱/۵۱	-
متوسط قطر ذرات (mm)	-	-	۲/۳۷
وزن هزاردانه (g)	۴۷/۶۶	۱/۵۵	-
رطوبت بر پایه‌ی خشک (%)	۸/۳۲	۶/۰۷	۲۲/۳
زاویه پایداری	۲۷°	۲۳°	۳۰°
جرم حجمی ظاهری (kg/m^3)	۸/۶۲±۷۳۶/۸۱	۶/۱۵±۸۲۹/۹۵	۶/۹۷±۱۰۱۲/۶۶
جرم حجمی واقعی (kg/m^3)	۹/۴۴±۱۱۷۰/۴۷	۴/۷۵±۱۲۳۵/۱۹	۶/۰۴±۱۹۰۷/۸۱

با استفاده از معادله (۱) محدوده جریان کود و بذر
 عبوری از لوله سقوط برای کارنده‌ها مشخص شد.

$$Q = \frac{R_s \cdot H \cdot V}{3600} \quad (1)$$
 که در آن R_s میزان بذر مصرفی (kg ha^{-1})، Q دبی جرمی موزع (gr s^{-1})، H فاصله ردیف‌ها (cm)، و V سرعت پیشروی کارنده (km h^{-1}) است.

جدول ۲- کلاس‌های دبی جرمی بذرهای گندم و یونجه و کود سوپرفسفات تریپل

شماره	سرعت موزع (RPM)	گندم			یونجه			کود سوپرفسفات تریپل		
		gr s^{-1}	CV%	kg ha^{-1}	gr s^{-1}	CV%	kg ha^{-1}	gs^{-1}	CV%	kg ha^{-1}
۱	۵	۲/۶۵	۳/۸۷	۸۰/۱۶	-	-	-	۳/۷۵	۵/۲۱	۱۱۳/۴۴
۲	۱۰	۴/۶۲	۳/۱۲	۱۳۹/۷۶	۰/۴۲	۲/۶۱	۱۶/۶۱	۷/۹۹	۱/۹۴	۲۴۱/۷۱
۳	۱۵	۶/۹۱	۱/۸۹	۲۰۹/۰۴	۰/۶۴	۱/۳۷	۲۵/۳۱	۱۰/۸۴	۱/۳۶	۳۲۷/۹۳
۴	۲۰	۹/۷۰	۱/۲۶	۲۹۳/۴۴	۰/۸۲	۰/۸۲	۳۲/۴۳	۱۵/۱۴	۱/۰۵	۴۵۸/۰۲
۵	۲۵	۱۲/۱۳	۲/۸۶	۳۶۶/۹۵	۱/۰۳	۰/۸۳	۴۰/۷۴	۱۹/۱۹	۰/۶۷	۵۸۰/۵۳
۶	۳۰	۱۴/۲۲	۱/۷۹	۴۳۰/۱۸	۱/۲۱	۰/۳۹	۴۷/۸۶	-	-	-
۷	۳۵	۱۶/۸۱	۰/۹۹	۵۰۸/۵۳	۱/۴۰	۰/۷۱	۵۵/۳۸	-	-	-
۸	۴۰	۱۹/۰۲	۱/۰۶	۵۷۵/۳۹	۱/۵۷	۰/۸۴	۶۲/۱۰	-	-	-

نتایج و بحث

نتایج ارزیابی حسگر خازنی

به‌منظور مقایسه بهتر بین داده‌های حسگر خازنی و ترازوی رقیمی، داده‌ها بر اساس روش بیشینه نرمال کردن، نرمال شدند. با این روش تمام سیگنال‌ها در محدوده ۰ تا ۱ قرار گرفته و نه تنها امکان مقایسه حسگر با ترازوی رقیمی فراهم شد، بلکه امکان ارزیابی حسگر در پایش هر نرخ از کود و یا بذر کاری نیز فراهم گردید. باید اضافه نمود که اگر مقادیر اصلی مورد استفاده قرار می‌گرفت، داده‌ها در یک سطح قرار نداشته و امکان تشخیص مسیرهای پیمایشی سیگنال حسگر و داده‌های جرمی ترازو ممکن نبود.

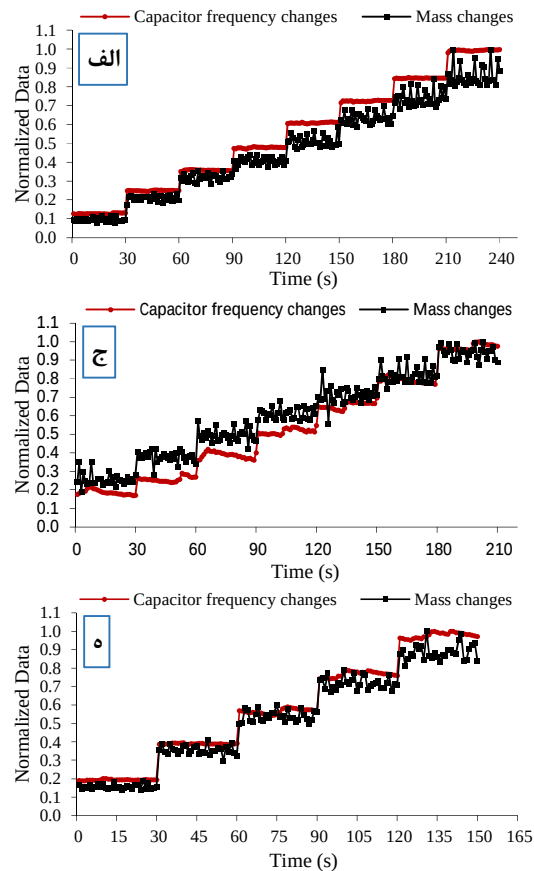
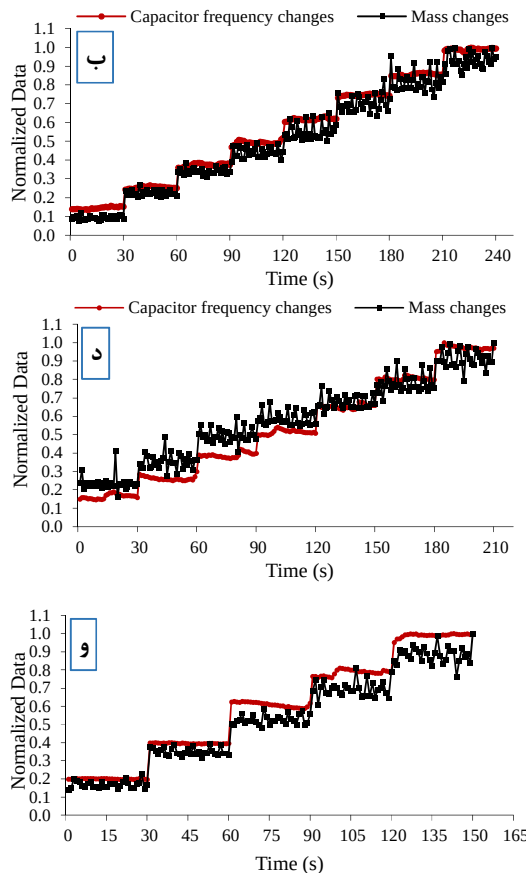
عملکرد حسگرها در تشخیص جریان بذر در صورتی مناسب است که تغییرات در مجموعه سیگنال خروجی به دست آمده از هر حسگر با تغییرات جرم بذر اندازه‌گیری شده توسط ترازوی شاخص رقیمی مطابقت داشته باشد. نمودارهای شکل ۴ سیگنال حسگر خازنی و جریان جرمی نرمال شده ترازو در نرخ‌های مختلف جریان جرمی را در دو حالت ایستا و پویا نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودارها پیداست با افزایش نرخ‌های مختلف جریان جرمی، تغییر در فرکانس خروجی حسگر خازنی به خوبی قابل مشاهده و تفکیک است. در پژوهشی جریان جرمی چغندر قند به وسیله‌ی حسگر خازنی اندازه‌گیری شده بود (Kumhala et al., 2009). آن‌ها اظهار داشتند با

اندازه‌گیری تغییرات ثابت دی‌الکتریک حسگر خازنی در اثر تغییر در حجم مواد بین صفحه‌های آن می‌توان به تغییرات جرمی نمونه دست یافت. همچنین Kumhala et al. (2008) در اندازه‌گیری جریان توده‌ای مواد گیاهی از بین صفحه‌های موازی خازن به این نتیجه رسیدند که رابطه قوی بین میزان تغذیه مواد گیاهی عبوری از حسگر و فرکانس خروجی حسگر خازنی وجود دارد.

با توجه به شکل‌های ۴-الف، ۴-ب، ۴-ج و ۴-د مشاهده می‌شود که فرکانس خروجی حسگر خازنی برای مواد دانه‌ای گندم و کود سوپرفسفات تریپل در حالت‌های ایستا و پویا در طول زمان ۳۰ ثانیه برای هر نرخ مشخص تقریباً یکنواخت و پایدار است. این امر می‌تواند به دلیل ایجاد نرخ‌های دقیق دبی جرمی به‌وسیله‌ی سامانه راه‌انداز موزع باشد. اگر در داخل یک دبی جرمی مشخص نیز تغییراتی وجود داشته باشد، طول زیاد صفحات حسگر خازنی باعث می‌شود که فرصت تشخیص تغییرات لحظه‌ای در یک نرخ مشخص برای حسگر مقدور نباشد. اما در عین حال حسگر به خوبی توانسته نرخ‌های مختلف دبی جرمی را پایش و از هم تفکیک کند. تغییرات لحظه‌ای دبی جرمی ترازو در داخل نرخ‌های مختلف به دلیل ضربه ناشی از تماس لحظه‌ای مواد دانه‌ای با صفحه ترازو است و با خروجی حسگر خازنی که غیر مخرب و غیرتماسی است متفاوت خواهد بود. البته مقدار از این نوسانات در داخل یک نرخ مشخص می‌تواند به عدم

(CV) دبی جرمی عبوری به وسیله موزع زیاد است.

ریزش یکنواخت دانه به وسیله موزع باشد، که با توجه به جدول ۲ به ویژه برای نرخ‌های پایین ضریب تغییرات



شکل ۴- نمودار جریان جرمی و سیگنال حسگر خازنی برای (الف) بذر گندم در حالت ایستا، (ب) بذر گندم در حالت پویا، (ج) بذر یونجه در حالت ایستا، (د) بذر یونجه در حالت پویا، (ه) کود سوپرفسفات تریپل در حالت ایستا و (و) کود سوپرفسفات تریپل در حالت پویا

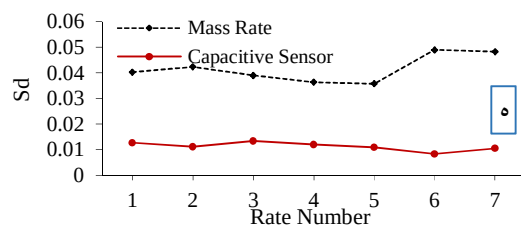
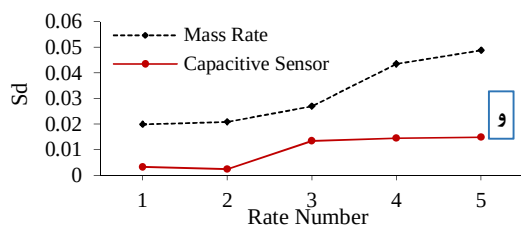
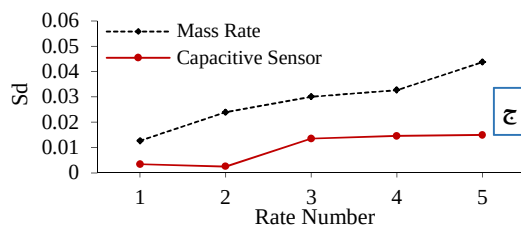
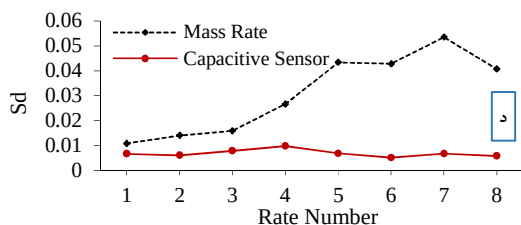
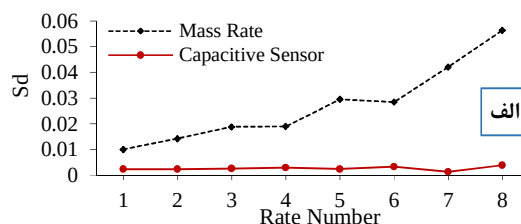
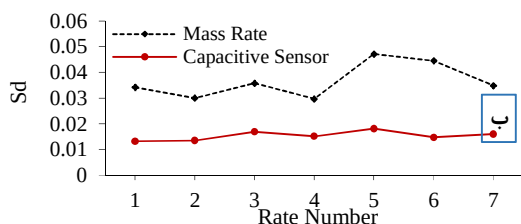
جریان جرمی را به خوبی از هم تفکیک کرده است. با توجه به اینکه اندازه‌گیر در حسگر خازنی بر پایه تغییرات دی‌الکتریک مواد صورت می‌گیرد، لذا دبی جرمی مواد دانه‌ای را که به شکل توده عبور می‌کنند به خوبی اندازه‌گیری می‌کند. این درحالی است که در حسگرهای جریان جرمی نوری زمانی که برخی از دانه‌ها تقریباً به طور هم‌زمان می‌ریزند و با یک‌دیگر همپوشانی دارند، اندازه‌گیری دبی جرمی به ویژه در نرخ‌های بالا به خوبی صورت نمی‌گیرد. در این صورت، برخی از دانه‌ها در سایه برخی دیگر می‌گذرند. بنابراین، حسگرهای گیرنده قادر به تشخیص دانه‌های اضافی نیستند. این مطلب در چندین مطالعه مورد بحث قرار گرفته است (Karimi et al., 2017; Cuhac et al., 2012; Kocher et al., 1998; Lan et al., 1999).

نرخ جریان جرمی خیلی پایین، حجم کم و اندازه ریز بذر یونجه باعث می‌شود، تغییرات دی‌الکتریک در حسگر خازنی کم و تشخیص آن به سختی و به صورت ضعیف صورت گیرد. همچنین نرخ ریزش پایین جریان عبوری برای بذر یونجه باعث می‌شود تغییرات دی‌الکتریک ناشی از وجود بذر، پایین و فضای خالی داخلی حسگر (هوا) افزایش یابد. در حسگر خازنی Bachman (1988) نیز تشخیص بذر، به ابعاد بذر، ثابت دی‌الکتریک بذر و فاصله بذر تا ناحیه حساس حسگر خازنی بستگی دارد.

با توجه به شکل‌های ۴-ج و ۴-د خروجی حسگر خازنی برای بذر یونجه در هر دو حالت ایستا و پویا در داخل هر نرخ مشخص دارای نوساناتی جزئی است و تمایل به غیریکنواختی دارد. با این وجود تمامی نرخ‌های

وسیله حسگر قابل اندازه‌گیری است (Karimi et al., 2017). شکل ۵ انحراف معیار محاسبه شده از سیگنال حسگر خازنی و ترازو در نرخ‌های مختلف را نشان می‌دهد.

مقدار انحراف معیار سیگنال نرمال شده دریافتی از حسگر خازنی باید با مقدار انحراف معیار داده‌های جریان جرمی نرمال شده ترازو در هر نرخ مشخص متناسب باشد، تا بتوان اظهار داشت که تغییرات داخل نرخ به



شکل ۵- نمودار جریان جرمی و سیگنال حسگر خازنی برای الف) بذر گندم در حالت ایستا، ب) بذر گندم در حالت پویا، ج) بذر یونجه در حالت ایستا، د) بذر یونجه در حالت پویا، ه) کود سوپرفسفات تریپل در حالت ایستا و و) کود سوپرفسفات تریپل در حالت پویا

توجه می‌کند، البته این نکته لازم به ذکر است که ممکن است در داخل هر نرخ تغییرات زیادی وجود نداشته باشد تا حسگر خازنی آن را پایش کند، اما در ترازو به دلیل برخورد دانه روی صفحه آن نوساناتی ثبت خواهد شد. با توجه به شکل ۶ برای هر سه مواد گندم، یونجه و کود سوپرفسفات تریپل در نرخ‌های بالا (به‌عنوان مثال نرخ ۸ برای گندم، نرخ ۷ برای یونجه و نرخ ۵ برای کود سوپرفسفات تریپل) مقدار انحراف معیار بیشتری برای داده‌های ترازو مشاهده شد. این نتیجه به دلیل نوسانات دبی جرمی و تماسی بودن ترازو است.

نتایج واسنجی حسگر خازنی

هدف از انجام آزمایش‌های این بخش، یافتن رابطه‌ای بین سیگنال خروجی حسگر خازنی و جریان جرمی پایش شده به‌وسیله ترازو بود. این رابطه می‌تواند به‌صورت

مقدار انحراف معیار فرکانس دریافتی از حسگر خازنی با مقدار انحراف معیار جریان جرمی ترازو در نرخ‌های مختلف متناسب نبود. به عبارتی حسگر خازنی نتوانست تغییرات دبی جرمی را متناسب با ترازوی رقمی در هر نرخ پایش کند. در حالی که تغییرات در دبی جرمی ترازو در اثر تغییرات جرم دانه‌ها روی صفحه ترازو است، تغییرات در حسگر خازنی به دلیل تصویر سطح دانه است که در حد فاصل دو صفحه خازن حسگر قرار می‌گیرد. لذا ممکن است دانه با جرم کمتر دارای تصویر سطح بیشتری در مقایسه با دانه با جرم بیشتر باشد. این مطلب توسط Kumhala et al. (2009) نیز تأیید شده است. همچنین طول زیاد صفحات حسگر خازنی باعث می‌شود که فرصت تشخیص تغییرات لحظه‌ای در یک نرخ مشخص برای حسگر مقدور نباشد. این امر عدم تناسب انحراف معیار فرکانس دریافتی حسگر و دبی جرمی ترازو را به خوبی

خازنی و ترازو، رگرسیون خطی بین این دو متغیر در دو حالت ایستا و پویا برای دو نوع بذر گندم، یونجه و کود سوپرفسفات تریپل به‌دست آمد. در جدول ۳ ضرایب تبیین بین این دو متغیر، میانگین مربعات خطا، میانگین درصد خطای مطلق و میانگین انحراف خطا برای بذره‌های گندم، یونجه و کود سوپرفسفات تریپل آمده است. داده‌های این بخش حاصل میانگین داده‌ها در دو تکرار هستند.

برقراری برازش بین داده‌های این دو متغیر انجام شود. جدول ۳ نتایج برازش جریان جرمی و خروجی حسگر خازنی در حالت ایستا و پویا برای دو نوع بذر گندم و یونجه و کود سوپرفسفات تریپل را نشان می‌دهد. برای بذره‌های گندم و یونجه و کود سوپرفسفات تریپل ضرایب تبیین به ترتیب ۰/۹۸۴، ۰/۹۴۴ و ۰/۹۸۲ به‌دست آمد. داده‌های این بخش حاصل میانگین داده‌ها در ۴ تکرار هستند.

برای اعتبارسنجی سامانه حسگرخازنی و رابطه بین نرخ جریان جرمی اندازه‌گیری شده به‌وسیله‌ی حسگر

جدول ۳- نتایج واسنجی حسگر خازنی برای مواد دانه‌ای مختلف

مقادیر ارزیابی برای مواد مختلف						ویژگی‌های ارزیابی
کود سوپرفسفات تریپل		یونجه		گندم		مدل پیش‌بینی
$Mr^* = 1/922 \times f - 0/197$		$Mr^* = 0/631 \times f - 0/248$		$Mr^* = 1/432 \times f - 0/247$		R^2 - واسنجی
۰/۹۸۲		۰/۹۴۴		۰/۹۸۴		
پویا	ایستا	پویا	ایستا	پویا	ایستا	شرایط ارزیابی
۰/۹۷۲	۰/۹۶۸	۰/۹۲۰	۰/۹۲۱	۰/۹۷۵	۰/۹۷۷	R^2 - اعتبارسنجی
۰/۹۴۸	۱/۱۰۸	۰/۱۲۰	۰/۱۱۶	۰/۸۹۳	۰/۸۱۹	RMSE (g/s)
۱۱/۲۲۴	۷/۱۸۴	۱۰/۳۲۶	۹/۲۶۴	۷/۲۱۲	۶/۹۶۲	MAPE (%)
-۰/۱۴۳	-۰/۰۵۲	-۰/۰۰۹	-۰/۰۲۱	-۰/۱۲۹	-۰/۰۱۸	MBE (g/s)

* Mr ، نرخ جریان جرمی (g s⁻¹) و f فرکانس خروجی حسگر خازنی (kHz) است.

درصد خطاهای به‌دست آمده نشان از دقت بالای حسگر در پایش نرخ‌های مختلف و برای هر سه نوع مواد آزمایشی دارد. با توجه به نتایج پایه‌ی ارتعاشی روی عملکرد حسگر خازنی تأثیری نداشت. حسگر خازنی توانست با ضریب تبیین بالا تمامی نرخ‌های جریان جرمی گندم، یونجه و کود سوپرفسفات تریپل را هم در حالت ایستا و هم در حالت پویا پایش کند. از این حسگر می‌توان به‌عنوان روشی قابل اتکا در اندازه‌گیری نرخ‌های مختلف جریان جرمی مواد کشاورزی بهره برد.

برای بیان بهتر نتایج اثر دو شرایط کاری حسگر (ایستا و پویا) و حالت‌های مختلف دبی جرمی برای هر سه مواد مورد آزمایش روی درصد خطای حسگر انجام شد، که نتایج تجزیه واریانس در جدول ۴ آمده است. داده‌های این بخش حاصل میانگین داده‌ها در سه تکرار هستند.

ضرایب تبیین به‌دست آمده نشان می‌دهد که حسگر خازنی به خوبی بذر گندم و کود سوپرفسفات تریپل، قادر به پایش نرخ‌های مختلف بذر یونجه نبود. دلیل این همان‌طور که قبلاً بیان شد، با توجه به شکل‌های ۴-ج و ۴-د خروجی حسگر خازنی برای بذر یونجه در هر دو حالت ایستا و پویا در داخل هر نرخ مشخص تغییراتو تمایل به غیریکنواختی داشت. غیریکنواختی توزیع مواد در بین صفحات خازن باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری خواهد شد (Stafford et al., 1996). از طرفی چون تغییرات در حسگر خازنی به دلیل تصویر سطح دانه است که در حد فاصل دو صفحه خازن حسگر قرار می‌گیرد، لذا اندازه کوچک دانه‌ها و دبی جرمی پایین بذر یونجه اثر کمتری نسبت به بذر گندم و کود سوپرفسفات تریپل روی ظرفیت خازن می‌گذارد. این نتیجه از نتایج حاصل از پژوهش (Kumhala et al., 2009) نیز قابل استنباط است. با این وجود ضرایب تبیین و

جدول ۴- تجزیه واریانس اثر حالت‌های ایستا و پویا و حالت‌های مختلف دبی جرمی روی درصد خطای حسگر برای دو نوع بذر گندم و

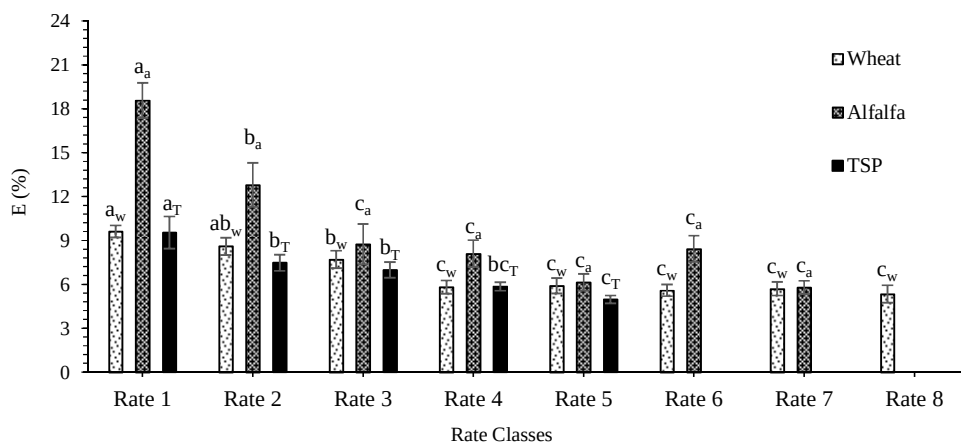
یونجه و کود سوپرفسفات تریپل

منابع تغییر		گندم		یونجه		کود سوپرفسفات تریپل	
	F	Sig.		F	Sig.	F	Sig.
شرایط (ایستا-پویا)	۰/۸۱۲ ^{ns}	۰/۳۷۴	۱/۵۱۷ ^{ns}	۰/۲۲۸	۰/۷۵۰ ^{ns}	۰/۳۹۷	۰/۰۰۰
کلاس دبی جرمی	۷/۷۸۴ ^{**}	۰/۰۰۰	۱۵/۵۴۳ ^{**}	۰/۰۰۰	۸/۷۲۴ ^{**}	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰

** معنی‌داری در سطح ۰/۰۱ و ns بی‌معنی.

مقایسه میانگین دانکن در سطح احتمال ۰/۰۵ درصد انجام شد (شکل ۶). روی شکل، مقایسه‌ها برای هر مواد به صورت جداگانه بررسی شده است و با شاخص حروف اول انگلیسی هر مواد مشخص شده است.

با توجه به جدول ۴ برای هر سه نوع مواد عبور داده شده از حسگر، اثر ارتعاش سامانه روی دقت حسگر بی‌معنی بود. اما اثر حالت‌های دبی جرمی مختلف در هنگام کار با هر سه مواد در سطح احتمال ۰/۰۱ درصد معنی‌دار بود. برای تجزیه و تحلیل بهتر این نتیجه آزمون



شکل ۶- مقایسه میانگین دانکن در سطح احتمال ۰/۰۵ درصد برای اثر حالت‌های (Classes) مختلف دبی جرمی روی میزان درصد خطای حسگر برای عبور بذر گندم و یونجه و کود سوپرفسفات تریپل - روی شکل مقایسه‌ها برای هر مواد به صورت جداگانه بررسی شده است و با اندیس حروف اول انگلیسی هر مواد مشخص شده است.

همان‌طور که در مطالعات بیان شده است، غیریکنواختی توزیع مواد در بین صفحات خازن باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری خواهد شد (Stafford et al., 1996). با توجه به نتایج آزمون مقایسه میانگین، دقت حسگر برای بذر گندم و کود سوپرفسفات تریپل بهتر از بذر یونجه است، که این نتیجه قبلاً نیز از نتایج دیگر استخراج شد.

باید در نظر داشت که حساسیت در مرکز یک حسگر خازنی با افزایش قطر حسگر کاهش می‌یابد (Wang & Yang, 2020). بنابراین هرچه از صفحات خازن به سمت مرکز حرکت کنیم، حساسیت حسگر خازن کمتر می‌شود. تنوع نرخ‌ها برای مواد مختلف، حداقل و حداکثر برداشتی مقطع لوله حسگر خازنی را فراهم می‌کند، که با

نتایج مقایسه میانگین برای هر سه مواد عبوری از حسگر نشان داد که دقت حسگر در نرخ‌های جریان جرمی بالاتر نسبت به نرخ‌های جریان جرمی پایین‌تر بیشتر است به عبارتی خطای حسگر در نرخ‌های بالا کمتر است. به عنوان مثال برای بذر گندم و یونجه نرخ‌های دبی جریان جرمی به ترتیب از ۴ الی ۸ و ۳ الی ۷ در یک حالت قرار گرفتند و در این محدوده اثر نرخ ریزش روی خطای حسگر بی‌معنی بود. با توجه به جدول ۲ ضریب تغییرات جریان مواد به وسیله موزع در نرخ‌های جریان جرمی پایین بیشتر است، به عبارتی موزع در نرخ‌های پایین نسبت به نرخ‌های بالاتر مواد را غیریکنواخت‌تر توزیع می‌کند و این می‌تواند دلیل خطای بالاتر حسگر خازنی در نرخ‌های پایین نسبت به نرخ‌های بالا باشد.

آن به سختی و به‌صورت ضعیف صورت گیرد. همچنین نرخ ریزش پایین جریان عبوری برای بذر یونجه باعث می‌شود تغییرات دی‌الکتریک ناشی از وجود بذر، پایین باشد و فضای خالی داخلی حسگر (هوا) افزایش یابد. با این وجود حسگر خازنی تمامی نرخ‌های جریان جرمی را به خوبی پایش کرد و حالت‌های مختلف دبی جرمی را از هم تفکیک کرد. با توجه به نتایج تجزیه واریانس پایه‌ی ارتعاشی روی عملکرد حسگر خازنی تأثیری نداشت.

منابع

- Adamchuk, V. I., Skotnikov, A. V., Speichinger, J. D., & Koller, K. (2004). Development of an instrumented deep-tillage implement for sensing of soil mechanical resistance. *Biological Systems Engineering*, 47(6): 1913-1919.
- Al-Mallahi, A. A., & Kataoka, T. (2013). Estimation of mass flow of seeds using fiber sensor and multiple linear regression modelling. *Computers and Electronics in Agriculture*, 99: 116-122.
- Amburn, R. D. (1980). U.S. Patent No. 4,239,010. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Anthonis, J., Vaes, D., Engelen, K., Ramon H., & Swevers, J. (2007). Feedback approach for reproduction of field measurements on a hydraulic four poster. *Biosystems Engineering*, 96(4): 435-445.
- Arslan, S., Inanc, F., Gary, J.M. and Colvin, T.S. (2000). Grain flow measurements with x-ray techniques. *Computers and Electronics in Agriculture*, 26(1): 65-80.
- ASAE. (1994). ASAE Standards S352.3-Moisture measurement-ungrounded grains and seeds. In: M. I. St. Joseph, ASAE Standards, 469 p.
- Aw, S. R., Rahim, R. A., Rahiman, M. H. F., Yunus, F. R. M., & Goh, C. L. (2014). Electrical resistance tomography: A review of the application of conducting vessel walls. *Powder Technology*, 254: 256-264.
- Bachman, W. J. (1988). U.S. Patent No. 4,782,282. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Balasubramanian, D. (2001). PH—Postharvest technology: Physical properties of raw cashew nut. *Journl of Agricultural Engineering Research*, 78(3): 291-297.
- Basu, S. (2018). *Plant Flow Measurement and Control Handbook: Fluid, Solid, Slurry and Multiphase Flow*. Chapter 8 - Solid Flow Measurement, Academic Press; 1st edition. PP 677-801.

ارزیابی حسگر برای میزان پرشدگی مختلف، حساسیت خازن نیز مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت و برای استفاده از حسگر در نرخ‌های بالاتر حتماً باید حسگر برای آن نرخ‌ها نیز واسنجی شود، تا خطای ناشی از متغیر بودن حساسیت خازن در نقاط مختلف سطح مقطع لوله و میزان پرشدگی آن جبران شود (Wang & Yang, 2020). باتوجه به اینکه حسگر خازنی به تغییرات رطوبت محیط و مواد بسیار حساس است (Stafford et al., 1996)، لازم است که مطالعات بیشتری برای حذف اثر رطوبت در پایش جریان جرمی به وسیله این حسگر صورت بگیرد تا بتوان از این روش به صورت عملیاتی‌تر استفاده کرد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک حسگر خازنی برای اندازه‌گیری دبی جرمی لوله سقوط خطی‌کارها به طور کامل طراحی و ساخته شد و برای نرخ‌های مختلف ریزش دو نوع بذر گندم و یونجه و کود سوپرفسفات تریپل در دو حالت ایستا و پویا ارزیابی شد. سیگنال خروجی حسگر خازنی برای مواد دانه‌ای گندم و کود سوپرفسفات تریپل در حالت‌های ایستا و پویا برای هر نرخ مشخص به مدت ۳۰ ثانیه در مقابل سیگنال خروجی ترازوی رقمی مرجع ترسیم شدند، نتایج حاصل از آن نشان داد که خروجی سیگنال ترازوی رقمی در طول مدت ۳۰ ثانیه برای هر نرخ دارای نوساناتی بود، در حالی که خروجی سیگنال حسگر خازنی در طول این مدت تقریباً عدد ثابت و پایداری بود. این به دلیل ماهیت ضربه‌ای بودن اندازه‌گیری دبی جرمی به وسیله ترازو پیش‌بینی شد. با افزایش نرخ‌های جریان جرمی فرکانس خروجی حسگر خازنی در هر نرخ مشخص یکنواخت‌تر بود. سیگنال خروجی حسگر خازنی برای بذر یونجه در هر دو حالت ایستا و پویا در داخل هر نرخ دارای نوسان بود و تمایل به غیریکنواختی دارد، که این به دلیل عدم یکنواختی ریزش بذر به وسیله موزع پیش‌بینی شد. چرا که موزع‌ها در نرخ‌های پایین مواد را به صورت غیر یکنواخت‌تری توزیع می‌کنند. از طرف دیگر تغییرات در خروجی حسگر خازنی بر پایه‌ی تغییرات دی‌الکتریک موجود در میان صفحات حسگر استوار بود، نرخ جریان جرمی خیلی پایین، حجم کم و اندازه ریز بذر یونجه باعث شد تغییرات دی‌الکتریک در حسگر خازنی کم و تشخیص

- technique. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 13(1): 0202.
- Karimi, H., Navid, H., Besharati, B., & Eskandari, I. (2019). Assessing an infrared-based seed drill monitoring system under field operating conditions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162: 543–551.
- Karimi, H., Navid, H., Besharati, B., Behfar, H. & Eskandari, I. (2017). A practical approach to comparative design of non-contact sensing techniques for seed flow rate detection. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142: 165–172.
- Klemme, K. A., Joseph, A., Schumacher, J. A., & Froehlich, D. P. (1992). Results and advantages of a spacially variable technology for crop yield. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 101: 364–372.
- Knepler, J. T. (1979). U.S. Patent No. 4,164,669. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Kocher, M. F., Lan, Y., Chen, C., & Smith, J. A. (1998). Opto-electronic sensor system for rapid evaluation of planter seed spacing uniformity. *Trans. ASAE*, 41: 237–245.
- Kuang, B., Tekin, Y., & Mouazen, A. (2015). Comparison between artificial neural network and partial least squares for on-line visible and near infrared spectroscopy measurement of soil organic carbon, pH and clay content. *Soil and Tillage Research*, 146: 243–252.
- Kumhala, F., Kroulik, M., & Prosek, V. (2007). Development and evaluation of forage yield measure sensors in a mowing-conditioning machine. *Computers and Electronics in Agriculture*, 58(2): 154–163.
- Kumhala, F., Prosek, V., & Blahovec, J. (2009). Capacitive throughput sensor for sugar beets and potatoes. *Biosystems Engineering*, 102(1): 36–43.
- Kumhala, F., Prosek, V., Prosek, M., & Kroulik, M. (2008). Parallel Plate Mass Flow Sensor for Forage Crops and Sugar Beet. *American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*, Providence, Rhode Island.
- Lan, Y., Kocher, M. F., & Smith, J. A. (1999). Opto-Electronic Sensor System for Laboratory Measurement of Planter Seed Spacing with Small Seeds. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72(2): 119–127.
- Li, S., Li, L., Milliken, R., & Song, K. (2012). Hybridisation of partial least squares and neural network models for quantifying lunar surface minerals. *Icarus*, 221(1): 208–225.
- Besharati, B., Navid, H., Karimi, H., Behfar, B., & Eskandari, I. (2019). Development of an infrared seed-sensing system to estimate flow rates based on physical properties of seeds. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162: 874–881.
- Bogunovic, I., Pereira, P., Kisic, I., Sajko, K., & Sraka, M. (2018). Tillage management impacts on soil compaction, erosion and crop yield in Stagnosols (Croatia). *CATENA*, 160: 376–384.
- Borgelt, S. C. (2015). *Sensing and measurement technologies for site specific management*. pp. 139–157. In: Robert, P.C., Rust, R.H. and Larson, W.E. (Eds). *Proceeding of Soil Specific. Crop management* John Wiley and Sons, Ltd.
- Boydas, M. G., & Turgut, N. (2007). Effect of vibration, roller design, and seed rates on the seed flow evenness of a studded feed roller. *Applied Engineering in Agriculture*, 23(4): 413–418.
- Chow, L., Xing, Z., Rees, H., Meng, F., Monteith, J., & Stevens, L. (2009). Field performance of nine soil water content sensors on a sandy loam soil in new brunswick, Maritime Region, Canada. *Sensors*, 9(11): 9398–9413.
- Cuhac, C., Virrankoski, R., Hänenen, P., Elmusrati, M., Hööpakka, H., & Palomäki, H. (2012). Seed flow monitoring in wireless sensor networks. In: *2nd Workshop on Wireless Sensor Systems (WoWSS2012)*.
- Dursun, E., & Dursun, I. (2005). Some physical properties of caper seed. *Biosystems Engineering*, 92(2): 237–245.
- Fathauer, G. H. (1975). U.S. Patent No. 3,881,353. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Figueiredo, P. G., Bicudo, S. J., Chen, S., Fernandes, A. M., Tanamati, F. Y., & Djabou-Fondjo, A. S. M. (2017). Effects of tillage options on soil physical properties and cassava-dry-matter partitioning. *Field Crops Research*, 204(15): 191–198.
- Hu, H. L., Xu, T. M., Hui, S. E., & Zhou, Q. L. (2006). A novel capacitive system for the concentration measurement of pneumatically conveyed pulverised fuel at power stations. *Flow Measurement and Instrumentation*, 17(2): 87–92.
- Kabas, O., Yilmaz, E., Ozmerzi, A., & Akinci, I. (2007). Some physical and nutritional properties of cowpea seed (*Vigna sinensis* L.). *Journal of Food Engineering*, 79(4): 1405–1409.
- Karimi, H., Navid, H., & Mahmoudi, A. (2015). Online laboratory evaluation of seeding-machine application by an acoustic

- Mohsenin, N. N. (1986). Physical Properties of Plant and Animal Materials. Structure, Physical Characteristics and Mechanical Properties. *Gordon and Breach Science Publishers*, 31(7): 702-702.
- Mouazen, A.M., Anthonis, J., & Ramon, H. (2005). An Automatic Depth Control System for Online Measurement of Spatial Variation in Soil Compaction, Part 4: Improvement of Compaction Maps by using a Proportional Integrative Derivative Depth Controller. *Biosystems Engineering*, 90(4): 409-418.
- Norden, K. E. (1998). Handbook of Electronic Weighing. Wiley-VCH, 1st edition, 488 pp.
- Ranjbari, S., Maleki, M.R., Mohammadi, F., Khodaei, J & Mollazade, K. (2023). Real-time monitoring of the mass flow rate of granular materials in the seeder tube using a piezoelectric sensor. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 54(1): 17-36. (In Persian).
- Reid, W. S., Buckley, D. J., & Mason, W. (1976). A Photoelectric seed counting detector. *Applied Engineering in Agriculture*, 21(2): 213-215.
- Reinke, R., Dankowicz, H., Phelan, J., & Kang, W. (2011). A dynamic grain flow model for a mass flow yield sensor on a combine. *Precision Agriculture*, 12(5): 732-749.
- Ren, j., Li, X., Zhao, K., Fu, B., & Jiang, T. (2016). Study of an on-line measurement method for the salt parameters of soda-saline soils based on the texture features of cracks. *Geoderma*, 263: 60-69.
- Riegler-Nurscher, P., Moitzi, G., Prankl, J., Huber, J., Karner, J., Wagentristl, H., & Vincze, M. (2020). Machine vision for soil roughness measurement and control of tillage machines during seedbed preparation. *Soil and Tillage Research*, 196: 104351.
- Schule, T., & Koller, K. (2008). Erosion control by using site-specific tillage. *Bulletin of the University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca Agriculture*, 65(1): 259-263.
- Sen, S., Das, P. K., Dutta, P. K., Maity, B., Chaudhuri, S., Mandal, C., & Roy S. K. (2000). PC-based gas-solids two-phase mass flowmeter for pneumatically conveying systems. *Flow Measurement and Instrumentation*, 11(3): 205-212.
- Singh, R. C., Singh, G., & Saraswat, D. C. (2005). Optimisation of Design and Operational Parameters of a Pneumatic Seed Metering Device for Planting Cottonseeds. *Biosystems Engineering*, 92(4): 429-438.
- Liptak, B. (2003). Instrument Engineers' Handbook. *Process Measurement and Analysis*, 1(4): 1861-1861.
- Maleki, M. R., Mouazen, A. M., De Ketelaere, B., & De Baerdemaker, J. (2006). A new index for seed distribution uniformity evaluation of grain drills. *Biosystems Engineering*, 94(3): 471-475.
- Maleki, M. R., mouazen, A. M., Ramen, H., & De Baerdemaeker, J. (2007). Optimisation of soil VIS-NIR sensor-based variable rate application system of soil phosphorus. *Soil and Tillage Research*, 94(1): 239-250.
- Maleki, M. R., Ramon, H., Baerdemaeker, D.E., & Mouazen, A. M. (2008). A study on the time response of a soil sensor-based variable rate granular fertiliser applicator. *Biosystems Engineering*, 100(2): 160-166.
- Marcus, A., & Maletic, J. I. (2003). Recovering Documentation-to-Source-Code Traceability Links using Latent Semantic Indexing. in *Proceedings 25th IEEE/ACM International Conference on Software Engineering (ICSE'03)*, Portland, OR, USA, 125-137.
- Mohammadi, F., Maleki, M. R., & Khodaei, J. (2022a). Control of variable rate system of a rotary tiller based on real-time measurement of soil surface roughness. *Soil and Tillage Research*, 215: 105216.
- Mohammadi, F., Maleki, M. R., & Khodaei, J. (2022b). Design, development, and technical evaluation of an automatic controlling system for repositioning of rotary tiller soil shield. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 53(2): 177-194. (In Persian).
- Mohammadi, F., Maleki, M.R., & Khodaei, J. (2022c). The Effect of Travel Speed and the Position of Rotary Tiller Hood on Soil Surface Roughness. *Agricultural Mechanization*, 6(4): 35-45. (In Persian).
- Mohammadi, F., Maleki, M. R., Rnjbari, S., & Jalal Khodaei. (2020). On-line measurement of seed and fertiliser level in drills hopper using Infrared method. *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*, 9(2): 95-106. (In Persian).
- Mohammadi, F., Maleki, M. R., & Khodaei, J. (2023a). Laboratory evaluation of infrared and ultrasonic range-finder sensors for on-the-go measurement of soil surface roughness. *Soil and Tillage Research*, 229: 105678.
- Mohammadi, F., Mousazadeh, H., & Jafari, A. (2023b). Online measurement of bulk solids mass flow rate based on centripetal force. *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*, 12(3): 23-35 (In Persian).

- Soleimani, M., Vauhkonen, M., Yang, W., Peyton, A., Kim, B. S., & Ma. X. (2007). Dynamic imaging in electrical capacitance tomography and electromagnetic induction tomography using a Kalman filter. *Measurement science and technology*, 18: 3287-3294.
- Stafford, J. V., Ambler, B., Lark, R. M., & Catt, J. (1996). Mapping and interpreting the yield variation in cereal crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 14(2-3): 101-119.
- Tarabi, N., Mousazadeh, H., Jafari, A., Taghizadeh-Tameh, J., & Kiapey, A. (2021). Developing and evaluation of an electrical impedance tomography system for measuring solid volumetric concentration in dredging scale. *Flow Measurement and Instrumentation*, 80: 101986.
- Vrindts, E., Mouazen, A. M., Reyniers, M., Martens, K., Maleki, M. R., Ramon, H. & De Baerdemaeker, J. (2005). Management zones based on correlation between soil compaction, yield and crop data. *Biosystems Engineering*, 92 (4): 419-428.
- Wagner, L. E., & Shrock, M. D. (1989). Yield determination using a pivoted auger flow sensor. *American Society of Agricultural Engineers*, 32(2): 409-413.
- Wang, H., & Yang, W. (2020). Application of electrical capacitance tomography in circulating fluidised beds – A review. *Applied Thermal Engineering*, 176, 115311.
- Xia, L., Wang, X., Geng, D., & Zhang, Q. (2011). Performance monitoring system for Precision planter based on MSP430-CT171. pp. 158-165. In: Li, D., Liu, Y., & Chen, Y. (Eds). Computer and Computing Technologies in Agriculture IV. CCTA 2010. IFIP Advances in Information and Communication Technology, Springer, Berlin, Heidelberg, 345 p.
- Yan, Y. (1996). Mass flow measurement of bulk solids in pneumatic pipelines. *Measurement Science and Technology*, 7(12): 1687-1706.
- Zhang, X., Liu, J., & He, B. (2014). Magnetic Resonance Based Electrical Properties Tomography: A Review. *IEEE Reviews In Biomedical Engineering*, 7: 87-96.
- Zheng, Y., Li, Y., & Liu, Q. (2007). Measurement of mass flow rate of particulate solids in gravity chute conveyor based on laser sensing array. *Optics & Laser Technology*, 39(2): 298-305.
- Zou, J., Liu, C., Wang, H., & Wu, Z. P. (2020). Mass flow rate measurement of bulk solids based on microwave tomography and microwave Doppler methods. *Powder Technology*, 360: 112-119.