



Real-time monitoring of the mass flow rate of granular materials in the seeder tube using a piezoelectric sensor

Salman Ranjbari ¹ | Mohammad Reza Maleki ² | Farzad Mohammadi ³ | Jalal Khodaei ⁴ | Kaveh Mollazade ⁵

1. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail:

s.ranjbari.uok@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: mrmaleki@uok.ac.ir

3. Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail:

farzadMohammadi@ut.ac.ir

4. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: :

j.khodaei@uok.ac.ir

5. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail:

k.mollazade@uok.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: March. 7, 2022

Revised: July. 1, 2023

Accepted: July. 23, 2023

Published online: Spring, 2023

Keywords:

*Contact sensing,
Precision agriculture,
Seed flow rate detection ,
Sensing unit ,
Sensor sensitivity.*

ABSTRACT

It is difficult to accurately measure the flow rate of seeds and fertilizers in grain drills, because the granules move in a continuous dense state. The purpose of this research was to monitor the mass flow of granular materials in the fall tube of the drill using a piezoelectric sensor. The laboratory system consisted of a repository box, a fluted roller metering device, a fall tube, and a piezoelectric sensor. To simulate the drill movement in the field, a vibrating stand was designed to oscillate the set-up in two perpendicular directions. The maximum amplitude stand was 8.99 cm according to the peaks and depressions available in a field after plowing. The sensor was evaluated in two static and dynamic modes for wheat seed, alfalfa seed, and triple superphosphate fertilizer with the usual drilling rate. The results showed the output signal of the sensor was proportional to all different mass flow rates in both static and dynamic states. The correlation coefficient was 0.95, 0.99, and 0.98 in static mode and 0.93, 0.86, and 0.98 in dynamic mode for wheat, alfalfa seed, and triple superphosphate fertilizer, respectively. In addition, the piezoelectric sensor could instantaneously monitor the sudden changes in the mass flow according to the reading of the digital scale. The results showed that the developed sensor can be used to monitor the mass flow rate of seeds and fertilizers in drills for calculating the drilling rate in real time.

Cite this article: 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. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2023.356512.665507>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2023.356512.665507>



پایش بلادرنگ نرخ جریان جرمی مواد دانه‌ای در لوله سقوط خطی کارها با استفاده از حسگر

پیزوالکتریک

سلمان رنجبری^۱ | محمدرضا ملکی^۲ | فرزاد محمدی^۳ | جلال خدائی^۴ | کاوه ملازاده^۵۱. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: s.ranjbari.uok@gmail.com۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: mrmaleki@uok.ac.ir۳. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: farzadmohammadi@ut.ac.ir۴. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: j.khodaei@uok.ac.ir۵. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: k.mollazade@uok.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

در خطی کاری پایش دقیق دبی بذر و کود مشکل است، زیرا دانه‌ها به صورت توده‌ای و نزدیک به هم حرکت می‌کنند. هدف از انجام این پژوهش پایش جریان جرمی مواد دانه‌ای در لوله سقوط خطی کارها با استفاده از یک حسگر پیزوالکتریک بود. سامانه آزمایشگاهی شامل مخزن، موزع، لوله سقوط و یک حسگر پیزوالکتریک بود. برای اینکه نوسانات حرکت خطی کار در مزرعه شبیه‌سازی شود، یک پایه ارتعاشی که در دو راستای عمود بر هم حرکت می‌کرد طراحی شد. بیشترین دامنه حرکت پایه ارتعاشی ۸/۹۹ سانتی‌متر متناسب با پستی و بلندی مزرعه پس از خاک‌ورزی در نظر گرفته شد. حسگر در دو حالت استاتیکی و دینامیکی برای بذر گندم، بذر یونجه و کود تریپل سوپرفسفات مطابق با نرخ کاشت معمول خطی کارها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد، سیگنال خروجی حسگر متناسب با تمامی نرخ‌های مختلف جریان جرمی در هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی بود. ضریب تبیین در حالت برای بذر گندم، بذر یونجه و کود تریپل سوپرفسفات به ترتیب ۰/۹۵، ۰/۹۹ و ۰/۹۸ بود. ضریب تبیین در حالت دینامیکی برای بذر گندم، بذر یونجه و کود تریپل سوپرفسفات به ترتیب ۰/۹۳، ۰/۸۶ و ۰/۹۸ بود. به علاوه، حسگر پیزوالکتریک به خوبی تغییرات لحظه‌ای جریان جرمی در هر نرخ را متناسب با خوانش ترازوی دیجیتال پایش نمود. نتایج نشان داد که حسگر توسعه یافته را می‌توان برای پایش نرخ جریان جرمی بذر و کود در لوله سقوط کارندها استفاده کرد تا به صورت برخط میزان اعمال نهاده در واحد سطح محاسبه شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۴/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۵/۱

تاریخ انتشار: بهار ۱۴۰۲

واژه‌های کلیدی:

تشخیص نرخ جریان جرمی، حساسیت حسگر، سنجش تماسی، کشاورزی دقیق، واحد سنجش

استاد: رنجبری؛ سلمان، ملکی؛ محمدرضا، محمدی؛ فرزاد، خدائی؛ جلال، ملازاده؛ کاوه، (۱۴۰۲) پایش بلادرنگ نرخ جریان جرمی مواد دانه‌ای در لوله

سقوط خطی کارها با استفاده از روش مبتنی بر ضربه، مجله مهندسی بیوسیستم ایران، ۵۴ (۱)، ۱۷-۳۶.

<https://doi.org/10.22059/ijbse.2023.356512.665507>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2023.356512.665507>

مقدمه

باتوجه به پیشرفت‌های اخیر در کشاورزی دقیق و به ویژه فناوری نرخ متغیر از جمله کوددهی نرخ متغیر (Maleki et al., 2008; Wang et al., 2022)، سمپاشی نرخ متغیر (Tewari et al., 2020)، آبیاری نرخ متغیر (Li et al., 2023)، خاک‌ورزی نرخ متغیر (Riegler-Nurscher et al., 2020; Mohammadi et al., 2022) و...، لازم است برای دستیابی به دقت بیشتر در عملیات کشاورزی این روند پیشرفت ادامه داشته باشد. از آنجا که در کشاورزی دقیق توزیع متناسب بذر و کود ضروری است، در مقایسه با بذرپاش‌ها و کودپاش‌ها، خطی‌کارها کارایی بهتری خواهند داشت. کاشت مناسب و یکنواخت بذر با به حداقل رساندن رقابت بین گیاهان برای نور، آب و مواد مغذی موجود، باعث جوانه زنی بهتر گیاهان و افزایش عملکرد می‌شود (Karayl & Ozmerzi, 2002). نزدیک شدن به نرخ کاشت مناسب و دقیق در واحد سطح مستلزم ایجاد یک دستگاه سنجش دقیق برای ارزیابی عملکرد بذرکاری ماشین‌های کاشت است. علاوه بر این موضوع، توسعه خطی‌کارهای کشت غلات در راستای ارتقای خصوصیات فنی آنها برای عملکرد بهتر در روش‌های کشاورزی دقیق مورد توجه محققان است (Xie et al., 2021; Yu et al., 2019). استفاده از روش‌ها و ابزارهایی که قادر باشند بذر و یا کود را با دقت کامل به‌طور یکنواخت و در عمق مناسب بکارند و هم‌زمان از سرعت و دقت بالایی نیز برخوردار باشند در کشاورزی دقیق مورد توجه است (Lee et al., 2017; Yatskul et al., 2010). عدم کاشت بذر و اعمال کود می‌تواند در وسعت زیاد به دلیل مشکلاتی مانند گرفتگی لوله‌های سقوط، خرابی‌های مکانیزم توزیع کود و بذر و خالی شدن مخزن بذر و کود اجتناب ناپذیر گردد. بنابراین وجود سامانه اندازه‌گیری بلادرنگ دبی جرمی خطی‌کارها به منظور نظارت بر عملکرد آنها در طول اعمال نهاده ضروری است. از طرفی با مجهز شدن کارنده‌ها به این سامانه پایش و سامانه موقعیت یابی جهانی (GPS)، تهیه نقشه عملیات بذر و کود در مزرعه امکان پذیر است.

اهمیت اندازه‌گیری جریان جرمی توسط (Al-Mallahi & Kataoka, 2013) گزارش شده است. در این تحقیق آمده است که مقدار واقعی توزیع بذر و کود در یک مزرعه با توجه به این‌که هیچ مکانیزم بازخوردی از جریان آنها در طول عملیات کاشت وجود ندارد، قابل تشخیص نیست. از طرف دیگر با افزایش سرعت پیشروی، کارنده‌ها با کاهش یکنواختی فاصله‌گذاری بذر و کود مواجه خواهند شد. مطابق نتایج به‌دست آمده از این پژوهش اگر سرعت پیشروی تراکتور برای عملیات خطی‌کارها از ۵ تا ۹ کیلومتر بر ساعت تغییر کند، جریان جرمی خروجی از خطی‌کارها متناسب با تغییر سرعت تغییر نخواهد کرد. علاوه بر این نشان داده شده است که به دلیل چرخه بسته عملیات خطی‌کارها، به‌هنگام کار در مزارع وسیع تغییرات اجتناب ناپذیری در نرخ جریان جرمی به دلیل مشکلاتی نظیر خرابی‌های مکانیزم توزیع بذر، گرفتگی لوله‌های بذر، خالی شدن مخزن رخ خواهد داد. عدم وجود سامانه پایش عملکرد در خطی‌کارها، با توجه به عدم اطمینانی که از تراکم مناسب بذرهای کاشته شده در واحد سطح مزرعه به‌وجود می‌آورد و نیز عدم آگاهی از نحوه کارکرد کارنده، ضررهای مالی قابل توجهی را به کشاورزان تحمیل می‌کند. به‌علاوه در کودکارها اضافه کوددهی ممکن است باعث آلودگی مزرعه شود. با اندازه‌گیری نرخ عبور جریان جرمی کود در کودکارها و یا کودریزها و نیز نرخ عبور جریان جرمی بذر در خطی‌کارها به‌صورت بر خط این نقص جبران خواهد شد. روش‌های اندازه‌گیری نوری برای تعیین نرخ کاشت به‌طور گسترده توسط محققان بررسی شده است (Karimi et al., 2017; Besharati et al., 2019; Liu et al., 2019). با این حال، به دلیل گرد و غبار زیاد در طول فرآیند کاشت، غیر قابل اعتماد هستند. یک جایگزین امیدوارکننده، استفاده از حسگرهای پیزوالکتریک پلیمری یا سرامیکی برای تشخیص میزان بذرهای کاشته شده است. بنابراین هدف از انجام پژوهش حاضر طراحی، پیاده‌سازی و ارزیابی یک سامانه‌ی اندازه‌گیری جریان جرمی تماسی (پیزوالکتریک) به‌منظور مدل‌سازی و اندازه‌گیری جریان جرمی در لوله سقوط کارنده‌ها و کودکارها است.

پیشینه پژوهش

روش‌های متعددی برای طراحی و ساخت حسگرهای پایش عملکرد کارنده‌ها برای افزایش دقت در کاشت، بهینه کردن بذر و کود مصرفی، ارزیابی کارنده‌ها و کودکارها به‌صورت آزمایشگاهی و مزرعه‌ای ارائه شده است. روش‌های اندازه‌گیری را می‌توان در یک دسته‌بندی کلی به دو گروه تماسی و غیرتماسی تقسیم کرد. علاوه بر پرهزینه بودن روش‌های غیر تماسی، دستیابی به فناوری ساخت این روش‌ها آسان نیست. با توجه به اینکه در روش‌های تماسی جریان جرمی مواد مستقیماً به وسیله حسگر تماسی اندازه‌گیری می‌شود، علاوه بر دقت خوب این روش، واسنجی این روش برای مواد مختلف ساده‌تر و سریع‌تر صورت می‌گیرد (Zheng & Liu, 2011). تحقیقات نشان داده است

اکثر روش‌های غیر تماسی نسبت به رطوبت، اندازه ذرات، پارامترهای الگوی جریان^۱ و ترکیب شیمیایی جامدات کاملاً حساس هستند (Zhang et al., 2021; Coulthard et al., 1991). روش‌های غیر تماسی بسته به نوع امواج ارسالی و اصل اندازه‌گیری می‌تواند روش‌های مختلفی را شامل شود. اما روش‌های تماسی به طور کلی شامل؛ حسگرهای ضربه‌ای و پیزوالکتریک (Liptak, 2003; Borgelt, 2015)، حسگرهای مبتنی بر نیروی مرکزگرا (محمدی و همکاران، ۱۴۰۱)، دی‌سنج مبتنی بر نیروی کوریولیس (Norden, 1998; Marcus & Maletic, 2003; Basu, 2018)، هلیس حمل‌کننده لولایی (Wagner & Shrock, 1998) و حسگرهای الکترومغناطیسی تماسی (Knepler, 1979) است. همچنین از روش‌های توموگرافی در اندازه‌گیری دبی جرمی جریان‌های چند فاز استفاده شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به توموگرافی ظرفیت خازنی (ECT^۲) (موسی‌زاده و همکاران ۱۴۰۲؛ Maung et al., 2020; Hu et al., 2006)، توموگرافی مقاومت الکتریکی (ERT^۳) (Aw et al., 2014)، توموگرافی مغناطیسی الکتریکی (EMT^۴) (Soleimani et al., 2007; Zhang et al., 2014)، توموگرافی خصوصیات الکتریکی (EPT^۵) (Zhang et al., 2014)، توموگرافی امپدانس الکتریکی (EIT^۶) (Tarabi et al., 2021)، توموگرافی نوری الکتریکی (EOT^۷) (Zheng et al., 2007) و حسگر توموگرافی مایکروویو (MWT^۸) (Zou et al., 2020) اشاره کرد. 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 بالای فناوری ساخت، این سامانه‌ها مطلوب استفاده در لوله‌های سقوط خالی کارها نیستند.

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 & Saraswat, 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 مشکل است.

در راستای خودکارسازی واحد کوددهی و بذر کاری کارنده‌ها، گروهی از پژوهشگران به اندازه‌گیری و نمایش مداوم میزان بذر و کود در مخزن کود و بذر خالی کارها پرداختند، که در این پژوهش به جریان جرمی مواد عبوری نرسیدند (محمدی و همکاران، ۱۳۹۹). روش‌های نوری توسط بسیاری از پژوهشگران برای پایش دبی جرمی مواد گرانوله مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است (Karimi et al., 2017; Besharati et al., 2019; Xie et al., 2021). اما از جمله مشکلات عمده این روش‌ها علاوه بر گران بودن، وجود عامل محدود کننده گرد و خاک در زمان عملیات به ویژه برای لوله سقوط کارندها در مزرعه است. یکی دیگر از محدودیت‌های روش‌های نوری خطاهای اندازه‌گیری ناشی از همپوشانی دانه است، که مجموعه حسگر اطلاعاتی را از قسمت میانی توده نمی‌دهند (Liu et al., 2019). برای رفع این مشکل Liu et al. (2019) در پژوهشی از روشی خلاقانه بهره بردند، که این روش جریان پیوسته بذر را به ذرات جدا شده تبدیل می‌کند. در چندین پژوهش هم از روش خازنی برای پایش جریان جرمی مواد گرانوله استفاده شده است (Bachman, 1988; Kumhala et al., 2007)، که از عمده مشکلات این روش می‌توان به دقت پایین در اندازه‌گیری و وابسته بودن به رطوبت محیط و مواد اشاره کرد. همچنین روش‌های مبتنی بر امواج فراصوت (Zhang et al., 2021; Klemme et al., 1992; Karimi et al., 2015)، مایکروویو (Amburn, 1980)، حسگر مادون قرمز (Karimi et al., 2017; Besharati et al., 2019)، دیود لیزری (Xie et al., 2021; Karimi et al., 2017)، مقاومت نوری و فیبر نوری (Al-Mallahi & Kataoka, 2013) برای اندازه‌گیری نرخ بذر و کود، به دلیل تجهیزات و هزینه زیاد نمی‌تواند هم زمان روی لوله‌های سقوط خالی کار و کودکاری که دارای چندین لوله سقوط است، مورد استفاده قرار گیرد. اندازه‌گیری دبی جرمی مواد فله‌ای مبتنی بر روش مرکزگرا توسط گروهی از پژوهشگران در اندازه بزرگ (قطر فلنج ورودی ۳۰ سانتی‌متر) صورت گرفته است (محمدی و همکاران، ۱۴۰۲). با وجود پاسخ دقیق دستگاه ساخته شده برای نرخ‌های مختلف جریان جرمی گندم، اما با توجه به ابعاد کوچک‌تر و شرایط کار در مزرعه، برای استفاده در لوله سقوط خالی کارها پیشنهاد نمی‌شود. همانطور که اشاره شد یکی دیگر از روش‌های تماسی پایش جریان جرمی روش‌های مبتنی بر ضربه است. در یک روش ضربه‌ای حسگر بر اساس مقدار جابجایی صفحه

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

بارگذاری شده ناشی از ضربات برخورد دانه با صفحه، جریان جرمی را اندازه‌گیری می‌کند، که نیروی ناشی از جابه‌جایی صفحه به‌وسیله‌ی یک بارسنج اندازه گرفته می‌شود. تغییر شکل در بارسنج باعث تغییر در ولتاژ خروجی آن شده که این تغییرات ولتاژ، از طریق یک میکروکنترلر که به رایانه متصل است میزان شدت جریان جرمی لحظه‌ای محصول (عملکرد لحظه‌ای) را نشان می‌دهد. در روشی دیگر می‌توان از خاصیت پیزوالکتریک برای پایش جریان جرمی مواد بهره برد. با اعمال نیرو روی مواد پیزوالکتریک، دو قطبی‌های آن‌ها تحریک شده و میدان الکتریکی ایجاد خواهد شد. ایجاد اختلاف پتانسیل الکتریکی در بلورهای نارسا مانند کوارتز که زیر بار کشش یا فشار معکوس هم هستند به وجود می‌آید، هر چه مقدار ضربه به صفحات پیزوالکتریک بیشتر باشد، اختلاف پتانسیل به وجود آمده بیشتر خواهد بود. در پژوهش (Goulden & Mason, 1958) یک سامانه حسگر بذر کتان نوع پیزوالکتریک ساخته و ارزیابی شده بود. در این سامانه از یک ظرف مرتعش به‌عنوان مخزن بذر استفاده شده بود. بذر‌ها از مخزن به روی کریستال پیزوالکتریک ریخته می‌شدند و بر اثر ضربه‌ی حاصل از برخورد بذر به حس کننده‌ی پیزوالکتریک ولتاژی بین دو سر خروجی پیزوالکتریک تولید می‌شد. دامنه‌ی سیگنال الکتریکی به‌وسیله‌ی لامپ خلاء^۱ که نقش یک تقویت کننده^۲ عملیاتی را بر عهده داشت تقویت شده بود. این حسگر توانایی شمارش بذر کتان حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ دانه در دقیقه را داشت. اما این اندازه برای محدوده کاری خطی کارها نمی‌تواند کاربردی باشد. بنابر این لازم است که برای شرایط کار خطی کارها توسعه داده شوند. پژوهش (Huang et al., 2013) سامانه‌ای را با استفاده از فیلم پلی وینیلیدن فلوراید (PVDF^۳) به شکل یک پرتوی کنسولی توصیف می‌کند، که از ولتاژ تولید شده توسط دانه‌های سقوط کرده برای نظارت بر فرآیند کاشت استفاده می‌کند. هنگامی که پالس‌های ولتاژ تولید نمی‌شوند، نشان می‌دهد که گرفتگی در سیستم رخ داده است. (Gierz & Paszkiewicz, 2020) نتایج آزمایشی را در مورد استفاده از حسگرهای پیزوالکتریک ساخته شده از فیلم PVDF برای شمارش دو نوع دانه جو و تریتیکاله^۴ و بررسی گرفتگی در لوله کارنده‌ها ارائه کردند. در سامانه آزمایشی این گروه دانه‌ها به همراه سرعت باد به سمت حسگر سوق داده می‌شدند. اندازه‌گیری برای فرکانس‌های مختلف تغذیه انجام می‌شد. بر اساس سیگنال‌های ثبت شده، الگوریتم شمارش دانه‌های کاشته شده توسعه و آزمایش شده بود. الگوریتم توسعه یافته شمارش بیش از ۹۰ درصد دانه‌های کاشته شده را امکان‌پذیر کرده بود. در این پژوهش نیز توده مواد در نظر گرفته نشد و فقط برای شمارش تعداد دانه‌ها محدود بود. (Zhao et al., 2011) یک سامانه پایش جداسازی تلفات دانه برای واحد جداکننده‌ی کمابین برنج را به‌صورت آزمایشگاهی توسعه دادند. از یک فیلم PVDF به ضخامت ۰/۵ میلی‌متر و مساحت ۲۰ میلی‌متر در ۱۰۰ میلی‌متر به‌عنوان مواد حساس برای طراحی یک حسگر جریان دانه استفاده کردند. لرزش‌های کمابین بر ولتاژ خروجی تأثیر معنی‌داری داشت، بعد از تبدیل فوریه سریع (FFT^۵) مشخص شد که فرکانس‌ها کمتر از ۸۰۰ هرتز می‌باشد. با پردازش سیگنال‌های الکتریکی حاصل از برخورد دانه و مواد زائد مانند کاه و کلش به صفحه و تفکیک آن‌ها متناسب با سیگنال‌های خروجی، تعداد دانه‌ها را شمارش کرده و همچنین تلفات دانه را هم اندازه‌گیری کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که اشتباهات اندازه‌گیری تلفات جداسازی دانه ضعیف شده به‌وسیله‌ی سامانه پایش نسبت به تلفات چک شده به‌صورت دستی کمتر از ۱۲ درصد بود.

همانطور که پیداست مطالعات در مورد استفاده از حسگرهای پیزوالکتریک محدود است. با توجه به قیمت پایین چنین حسگرهایی، استحکام بالا، فرکانس کاری بالا و نسبت سیگنال به نویز بالا، امکان شمارش دقیق بذرهای کاشته شده را فراهم می‌کند (Chen & Payne, 1995; Seminara et al., 2011). با توجه به پتانسیل روش پیزوالکتریک به نظر می‌رسد با طراحی مناسب این روش متناسب با لوله سقوط خطی کارها و توسعه مدار الکترونیک آن می‌توان از این روش برای پایش جریان جرمی مواد دانه‌ای در لوله سقوط خطی کارها بهره برد.

در این پژوهش یک سامانه‌ی اندازه‌گیری جریان جرمی تماسی مبتنی بر ضربه (پیزوالکتریک) به‌منظور مدل‌سازی و اندازه‌گیری جریان جرمی دانه‌ها در کارنده‌ها و کودکارها طراحی و پیاده‌سازی شد. یک واحد خطی کار مجهز به یک پایه‌ی ارتعاشی، برای نصب سامانه و ارزیابی آن ساخته شد. سپس سامانه برای جریان جرمی سه نوع مواد گرانوله شامل کود تریپل سوپرفسفات و بذرهای گندم و یونجه عبور داده شده از لوله سقوط، واحد خطی کار به‌صورت استاتیکی و دینامیکی ارزیابی شد.

1. Vacuum tube
2. Amplifier
3. Polyvinylidene fluoride film
4. Triticale
5. Fast Fourier Transform (FFT)

روش‌شناسی پژوهش

مواد دانه‌ای

از آنجا که طراحی و ساخت سامانه‌های مجهز به حسگرهای اندازه‌گیری جریان جرمی بذر و کود برای خطی کارها 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 و یونجه رقم همدانی، و کود تریپل سوپر فسفات (Ca(H₂PO₄)₂ or TSP) به‌عنوان یکی از کودهای گرانوله شیمیایی رایج استفاده شد. دانه‌های تهیه شده قبل از انجام آزمایش به‌طور کامل تمیز و مواد خارجی و دانه‌های آسیب دیده از آن‌ها جدا شد. سپس با قرار دادن نمونه بذرهای یک خشک‌کن آزمایشگاهی (آون) در دمای 1 ± 100 درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت، طبق استاندارد وزنی (ASAE (1994) به شماره S352.3 رطوبت اولیه آن بر اساس رابطه (۱) بر پایه‌ی خشک تعیین شد. با استفاده از کولیس دیجیتال با قدرت تفکیک 0.01 میلی‌متر، اندازه‌گیری‌های ابعادی شامل (طول، عرض، ضخامت) برای ۵۰ دانه به‌طور تصادفی که از کل نمونه‌ها انتخاب شده بودند انجام شد. قطر متوسط حسابی، قطر متوسط هندسی، کرویت، زاویه پایداری، جرم حجمی ظاهری و جرم حجمی واقعی مطابق روابط (۱) الی (۷) برای آن‌ها محاسبه شد (Mohsenin, 1986; Balasubramanian, 2001; Dursun & Dursun, 2005; Kabas et al., 2007; Ghasemi, 2008).

$$M_d = \frac{W_w}{W_d} \times 100 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$D_a = \frac{L + W + T}{3} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$D_g = (LWT)^{\frac{1}{3}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\phi = \frac{(LWT)^{1/3}}{L} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{h}{a} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\rho_b = \frac{M}{V_b} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$\rho_a = \frac{M}{V_a} \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در این روابط:

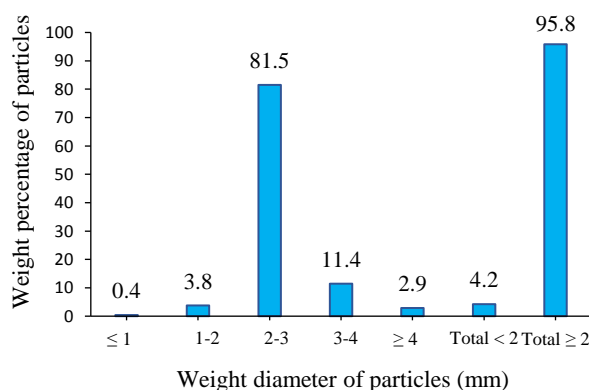
M_d رطوبت بر پایه‌ی خشک بر حسب درصد، W_w وزن آب موجود در محصول بر حسب گرم، W_d وزن ماده خشک بر حسب گرم، L طول دانه بر حسب میلی‌متر، W عرض دانه بر حسب میلی‌متر، T ضخامت دانه بر حسب میلی‌متر، D_a قطر متوسط حسابی بر حسب میلی‌متر، D_g قطر متوسط هندسی بر حسب میلی‌متر، ϕ کرویت، ρ_b جرم حجمی بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، V_b حجم استوانه بر حسب میلی‌لیتر، M جرم مواد دانه‌ای بر حسب گرم، ρ_a جرم حجمی واقعی بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، V_a حجم مواد دانه‌ای بر حسب میلی‌لیتر، θ زاویه پایداری بر حسب درجه، h ارتفاع کپه محصول بر حسب میلی‌متر و a نصف قاعده کپه محصول بر حسب میلی‌متر می‌باشد. همچنین برای تعیین وزن هزار دانه از ترازوی دیجیتال با قدرت تفکیک 0.01 گرم استفاده شد.

خواص فیزیکی کودها شامل اندازه ذره، زاویه پایداری، جرم حجمی (به‌صورت آزاد یا فله، به هم نچسبیده)، جرم حجمی واقعی و میزان رطوبت کود بر پایه‌ی خشک می‌باشد. نمونه‌های کود را در یک خشک‌کن آزمایشگاهی (آون) در دمای 1 ± 100 درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار داده و طبق استاندارد وزنی (ASAE (1994) به شماره S352.3 رطوبت اولیه آن بر اساس رابطه (۱) بر پایه‌ی خشک تعیین شد. جدول (۱) خواص فیزیکی بذرهای گندم، یونجه و کود تریپل سوپر فسفات را نشان می‌دهد.

طبقه بندی ابعاد دانه‌ای با توجه به ساخت تجاری محصول کود صورت می‌گیرد. تعیین و توزیع اندازه ذرات کود تریپل سوپر فسفات با غربال کردن نیم کیلوگرم کود به‌وسیله‌ی الک‌هایی با شماره مش‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر انجام شد. وزن مقادیر کودی که از هر غربال عبور کرد به‌وسیله‌ی ترازوی دیجیتال 0.01 گرمی اندازه‌گیری شد. شکل (۱) پراکنش وزنی اندازه ذرات کود تریپل سوپر فسفات را نشان می‌دهد.

جدول ۱. خواص فیزیکی بذرهاي گندم، يونجه و کود تريپل سوپر فسفات.

نوع مواد آزمایشی			شاخص
کود تريپل سوپر فسفات	يونجه	گندم	
-	۲/۱۵	۶/۰۵	طول (mm)
-	۱/۰۴	۲/۹۹	عرض (mm)
-	۱/۳۵	۳/۶۸	ضخامت (mm)
-	۰/۶۷	۰/۶۶	ضريب کروييت
-	۱/۴۴	۴/۰۵	قطر متوسط هندسي (mm)
-	۱/۵۱	۴/۲۴	قطر متوسط حسابي (mm)
۲/۳۷	-	-	متوسط قطر ذرات (mm)
-	۱/۵۵	۴۷/۶۶	وزن هزاردانه (g)
۲۲/۳	۶/۰۷	۸/۳۲	رطوبت بر پايه ي خشک (%)
۳۰°	۲۳°	۲۷°	زاويه پايداري
۱۰۱۲/۶±۶۶/۹۷	۸۲۹/۶±۹۵/۱۵	۷۳۶/۸±۸۱/۶۲	جرم حتمي ظاهري (kg/m ³)
۱۹۰۷/۶±۸۱/۰۴	۱۲۳۵/۴±۱۹/۷۵	۱۱۷۰/۹±۴۷/۴۴	جرم حتمي واقعي (kg/m ³)



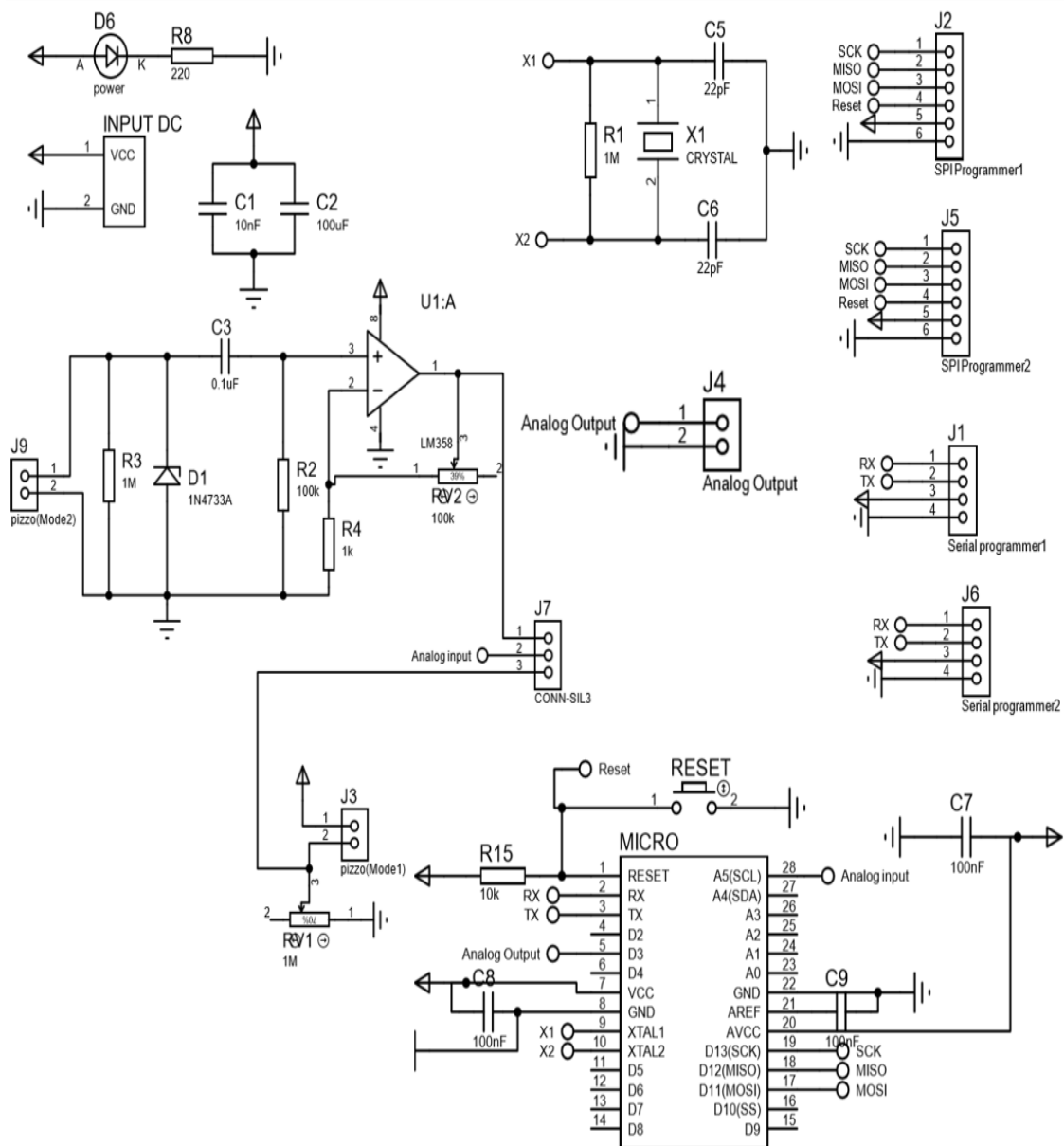
شکل ۱. پراکنش وزنی اندازه ذرات کود سوپر فسفات تريپل

حسگر پیزوالکتریک

در مقاله حاضر برای اندازه‌گیری جریان جرمی مواد از حسگر پیزوالکتریک استفاده شد. حسگر پیزوالکتریک مورد استفاده شامل یک کریستال به قطر ۵۰ میلی‌متر می‌باشد. این کریستال‌ها را به اصطلاح کریستال دیسکی می‌نامند. کریستال‌های دیسکی مانند یک دیسکت هستند و دارای دو خروجی مثبت و منفی هستند. ماده پیزوالکتریک بکار برده شده در ساخت حسگر تیتانات زیرکونات سرب^۱ بود. با برخورد دانه‌ها به کریستال پیزوالکتریک ولتاژی بین دو سر خروجی حسگر ایجاد می‌شود، سپس دامنه سیگنال الکتریکی به‌وسیله‌ی تقویت کننده تقویت گردید. مدار مربوطه شامل یک تقویت‌کننده‌ی عملیاتی (آی سی LM358) بود، که مقاومت ورودی آن ۱ MΩ بوده و بهره‌ی ولتاژ آن به‌وسیله‌ی دو عدد پتانسیومتر در ورودی mod1 و mod2 در بازه‌ی ۱ الی ۱۰۰ ولت قابل تغییر بود (شکل ۲). طراحی مدار راه‌انداز حسگر پیزوالکتریک به گونه‌ای صورت گرفت که در mod1 اطلاعات خروجی به‌صورت نرم‌افزاری و سخت‌افزاری کاملاً نوین‌گیری شده و حساسیت آن‌ها بین ۰ تا ۱۰۲۳ قابل تنظیم بود، که هر چه این عدد کوچکتر باشد حساسیت دستگاه بالاتر خواهد بود. از یک فیلتر بالا گذر فعال^۲ با ترکیب تقویت کننده LM358 با مقاومت ورودی ۱ MΩ با ترکیب سری خازن و مقاومت (RC) با یک خازن ۰/۱ uF و یک مقاومت ۱۰۰ kΩ برای فیلتر کردن ولتاژ خروجی حسگر استفاده شد (مدار شکل ۲). در نهایت از فیلتر میانگین‌گیری روی داده‌ها به صورت نرم‌افزاری استفاده شد. بهترین حالت برای اندازه‌گیری ضربه دانه‌های گندم و کود تريپل سوپرفسفات در حساسیت بین ۴۰۰ الی ۶۰۰ و برای بذریونجه در حساسیت ۵۰ الی ۱۰۰ مشاهده گردید. بنابر این از حساسیت ۴۰۰ برای گندم و کود تريپل سوپرفسفات و از

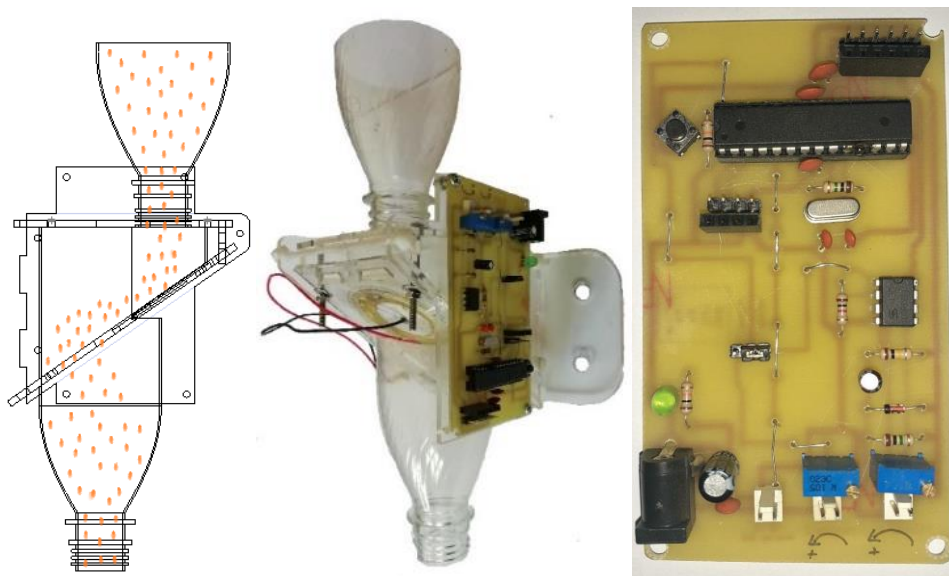
1. Lead zirconate titanate
2. Active High Pass Filter

حساسیت ۵۰ برای بذر یونجه در انجام آزمایش‌ها استفاده شد. از mod2 تنها در شرایطی استفاده می‌شود که سیگنال خروجی بسیار ضعیف و غیر قابل خواندن باشد، با این حال نویزهای ورودی نیز با همین توان تقویت خواهند شد، بنابراین در این پژوهش از mod2 استفاده نشد. تغذیه‌ی تقویت کننده نیز ۵ ولت DC بود تا در ضربه‌های محکم حداکثر ۵ ولت را در خروجی به صورت آنالوگ نشان دهد. با استفاده از ماژول USB to TTL داده‌ها به USB کامپیوتر برای فراخوانی و نمایش در نرم‌افزار لیبویا^۱ ورژن ۲۰۱۴ و همچنین ذخیره‌سازی در نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۳ ارسال شد. برای قرائت ولتاژ خروجی حسگر از یک میکروکنترلر AVR مدل Atmega328pu استفاده شد.



شکل ۲. مدار راه انداز حسگر پیزوالکتریک

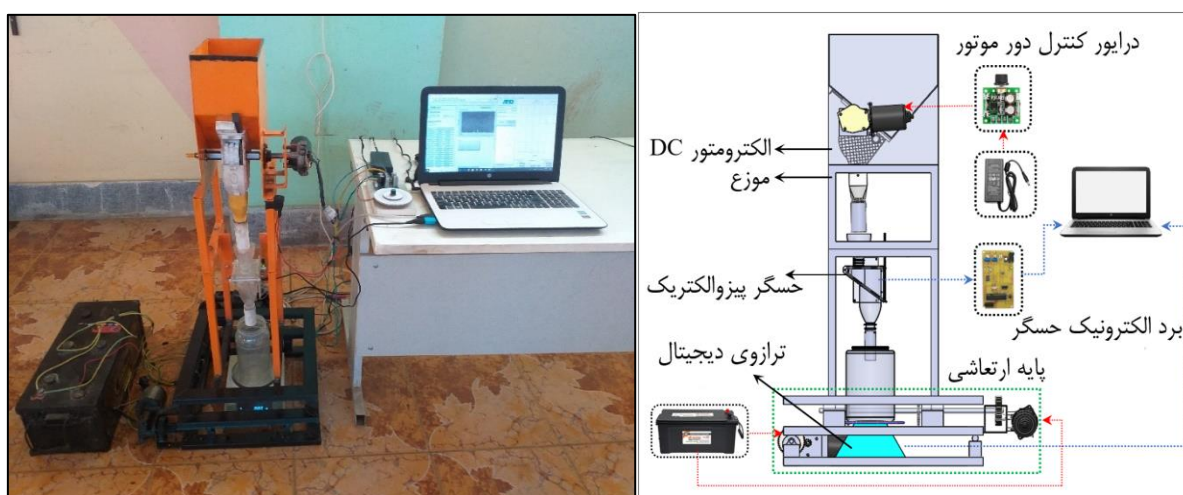
مجموعه حسگر پیزوالکتریک در شکل (۳) مشاهده می‌شود. در ساخت قاب حسگر از پلاستیک فایبرگلاس شفاف استفاده شد. قاب حسگر به گونه‌ای طراحی شده است که با قرار گرفتن سرامیک پیزوالکتریک در نشیمنگاه خود دارای زاویه‌ی ۳۵ درجه نسبت به خط افق باشد تا بذر و کود پس از برخورد به راحتی به سمت خروجی هدایت شوند. این زاویه به صورت تجربی در آزمایشگاه با در نظر گرفتن عبور بهتر دانه‌ها به دست آمد.



شکل ۳. مجموعه حسگر پیزوالکتریک

سامانه ارزیابی حسگر

یک دستگاه آزمایش برای انجام آزمایش‌ها طراحی و توسعه داده شد (شکل ۴). این دستگاه آزمایش شامل مجموعه حسگر پیزوالکتریک، یک واحد مخزن مجهز به موزع شیاردار غلطکی سه ردیفه، یک پایه ارتعاشی بادامکی به منظور شبیه‌سازی عملکرد خطی کار در مزرعه، یک ترازوی دیجیتال با قابلیت تفکیک 0.01 گرم و لپ تاپ بود. با توجه به اینکه حسگر پیزوالکتریک بر اساس ضربه عمل می‌کند، ارتفاع نصب حسگر روی سامانه به گونه‌ای بود تا حسگر حداقل جرم مواد عبوری را که مدنظر بود، بتواند اندازه‌گیری کند. برای این منظور به صورت تجربی و در آزمایشگاه حسگر در موقعیت ثابتی قرار گرفت و یک دانه از مواد آزمایش در ارتفاع‌های مختلف رها شد. در نهایت ارتفاعی که در آن حسگر توانست وجود دانه را حس کند با اندکی بیشتر به عنوان ارتفاع قرار گیری حسگر در نظر گرفته شد. در این پژوهش ارتفاع مرکز صفحه پیزوالکتریک از محل خروج دانه‌ها از موزع 252 میلی‌متر بود. برای تأمین دبی جرمی‌های مختلف موزع سامانه به یک الکتروموتور DC مجهز شد، که کنترل دور آن به وسیله یک درایور کنترل دور موتور DC-PWM صورت گرفت. بیشینه سرعت دورانی موتور 80 دور بر دقیقه بود، که می‌توانست سرعت‌های دورانی مختلف در بازه 5 الی 55 دور بر دقیقه را برای موزع ایجاد کند. به‌منظور اندازه‌گیری سرعت چرخش محور موزع از یک انکودر نوری دستی مدل (Tachometer AT-8) استفاده شد. طراحی پایه‌ی ارتعاشی برای سامانه آزمایش بر اساس اصول مطروحه در منابع علمی و مطابق اندازه‌های لازم، (Maleki et al., 2007 Boydas & Turgut, 2007; Anthonis et al., 2007) انجام شد. میزان جابه‌جایی، سرعت و شتاب در جهت Z این سامانه ارتعاشی به ترتیب $0.17/98$ میلی‌متر، $14/02$ الی $13/79$ میلی‌متر بر ثانیه و $25/11$ الی $25/22$ میلی‌متر بر مجذور ثانیه بود.



شکل ۴. پلتفرم سامانه ارزیابی حسگر پیزوالکتریک

با تغییر سرعت دورانی موزع، سطوح مختلف جریان جرمی توده‌ای بذر و کود تأمین می‌شد و ضمن عبور از داخل حسگر در درون یک ظرف جمع‌آوری و روی ترازو انباشته می‌شد. در این مدت ترازو وزن تجمعی و حسگر سیگنال دریافتی را به رایانه و نرم‌افزار لیبویو برای نمایش و ثبت در نرم‌افزار اکسل می‌فرستادند. داده‌های ترازو به‌وسیله‌ی یک کابل انتقال داده RS232 به رایانه و نرم‌افزار WinCT-FRD برای ثبت در نرم‌افزار اکسل ارسال شد.

واسنجی موزع دندانه‌دار

برای تشخیص یکنواختی و اطمینان از صحت عملکرد موزع واحد خطی کار در دبی‌های جرمی مختلف، آزمایشی صورت گرفت. آزمایش‌ها بر اساس میزان کاشت گندم، یونجه و اعمال کود تریپل سوپرفسفات برحسب کیلوگرم در هکتار انجام شد. در این آزمایش موزع شیاردار غلطکی سه ردیفه متناسب با سینماتیک سامانه راه‌انداز موزع در بازه ۵ الی ۴۰ دور در دقیقه برای گندم، ۱۰ الی ۴۰ دور در دقیقه برای یونجه و ۵ الی ۲۵ دور در دقیقه برای کود تریپل سوپرفسفات در دو حالت استاتیکی و دینامیکی مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت. برای انجام آزمایش‌ها در حالت دینامیکی پایه‌ی ارتعاشی شبیه‌ساز حرکت مزرعه که موزع واحد خطی کار روی آن نصب شده بود فعال گردید. سپس با تأمین نرخ‌های مختلف به‌وسیله موزع آزمایش‌ها انجام گرفت. آزمایش‌ها در شش تکرار انجام شد هر تکرار به مدت ۶۰ ثانیه برای گندم، یونجه و کود تریپل سوپرفسفات در دو حالت استاتیکی و دینامیکی صورت گرفت. در پایان هر آزمایش، مواد آزمایشی جمع‌آوری و به‌وسیله ترازو وزن شدند.

ارزیابی حسگر پیزوالکتریک

برای به‌دست آوردن رابطه‌ی بین جریان جرمی مواد دانه‌ای و سیگنال خروجی حسگر پیزوالکتریک، آزمایش‌های واسنجی برای سه نوع مواد آزمایشی (بذر گندم، بذر یونجه و کود تریپل سوپرفسفات) در دو حالت استاتیکی و دینامیکی برای سطوح بده جرمی مشخص شده در جدول (۲) انجام شد. 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 تریپل سوپرفسفات و ۱۳ سانتی‌متر برای بذر یونجه (Besharati et al, 2019; Karimi et al, 2019) صورت گرفت. به کمک رابطه (۸) محدوده جریان کود و بذر عبوری از لوله سقوط برای کارنده‌ها مشخص گردید.

$$Q = \frac{R_s \cdot H \cdot V}{3600} \quad \text{رابطه ۸}$$

که در آن R_s میزان بذر مصرفی (kg ha^{-1})، Q بده جرمی موزع (g s^{-1})، H فاصله ردیف‌ها (cm)، V سرعت پیشروی کارنده (km h^{-1}) می‌باشد.

جدول ۲. سطوح مختلف بده جرمی بذرهای گندم و یونجه و کود تریپل سوپرفسفات

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

داده‌های جریان جرمی ترازو با فرکانس ۵ هرتز و داده‌های حسگر پیزوالکتریک با فرکانس ۱۶۰ 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، داده‌های حسگر و جریان جرمی ترازو در مدت زمان یک ثانیه به‌صورت جداگانه با هم جمع‌آوری شدند، تا داده‌ها در واحد زمان یکسان با هم قابل

مقایسه و ارزیابی باشند. آزمایش‌ها برای دو حالت استاتیکی و دینامیکی برای بذره‌های گندم و یونجه و کود تریپل سوپر فسفات به صورت جداگانه در ۴ تکرار برای ارزیابی و در ۲ تکرار برای اعتبار سنجی انجام شدند.

یافته‌های پژوهش

نتایج واسنجی موزع واحد خطی کار

در واسنجی موزع واحد خطی کار، ضرایب تبیین در تأمین نرخ‌های مختلف برای هر سه نوع مواد آزمایشی و برای دو شرایط آزمایش استاتیکی و دینامیکی بیش از ۰/۹۹ به دست آمد. ضریب تغییرات (CV) برای بذره‌های گندم و یونجه و کود تریپل سوپر فسفات در حالت استاتیکی به ترتیب ۲/۱۱، ۰/۹۷ و ۱/۳۷ درصد. در حالت دینامیکی به ترتیب ۱/۱۱، ۱/۱۸ و ۱/۰۴ درصد به دست آمد. ضرایب تبیین بیش از ۰/۹۹ و ضرایب تغییرات بسیار ناچیز، نشان می‌دهد که موزع قابلیت تأمین نرخ یکنواخت در جریان‌های مختلف جرمی را دارد.

Boydas & Turgut (2007) در پژوهشی یکنواختی جریان دانه را در موزع‌های غلطکی شیاردار در شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها اثر چهار سطح ارتعاشی، سه نوع موزع غلطکی شیاردار و دو سرعت چرخش موزع را بر نرخ جریان و یکنواختی جریان دانه بررسی کردند و ضریب تغییرات جریان دانه را در آزمون آزمایشگاهی به دست آوردند. نتایج آن‌ها نشان داد که سطوح ارتعاشی تأثیری بر یکنواختی جریان گندم نداشت، ولی بر یکنواختی جریان جرمی جو به طور معنی‌داری تأثیر گذار بود. همچنین افزایش نرخ کاشت به طور معنی‌داری یکنواختی جریان دانه را بهبود بخشید. در پژوهش حاضر با توجه به ضرایب تغییرات به دست آمده در بده‌های جرمی مختلف به وسیله موزع غلطکی شیاردار سه ردیفه، با افزایش نرخ‌های جریان جرمی هر سه ماده‌ی آزمایشی، میزان یکنواختی ریزش افزایش پیدا کرد. همچنین پایه‌ی ارتعاشی در حالت دینامیکی بر میزان یکنواختی ریزش تأثیری نداشت که Boydas & Turgut (2007) نیز در پژوهش خود به همین نتیجه دست یافتند.

نتایج ارزیابی حسگر پیزوالکتریک

به منظور مقایسه بهتر بین داده‌های حسگر پیزوالکتریک و ترازوی دیجیتال، داده‌ها بر اساس روش نرمال سازی بیشینه، نرمال شدند. با این روش تمام سیگنال‌ها در محدوده ۰ تا ۱ قرار گرفته و نه تنها امکان مقایسه حسگر با ترازوی دیجیتال 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 حسگر پیزوالکتریک در تشخیص جریان بذر در صورتی مناسب است که تغییرات در مجموعه سیگنال خروجی به دست آمده از حسگر با تغییرات جرم مواد دانه‌ای اندازه‌گیری شده به وسیله ترازوی شاخص دیجیتال مطابقت داشته باشد. نمودارهای شکل (۵) نتایج حاصل از آزمایش بررسی جریان جرمی حسگر پیزوالکتریک برای بذر گندم و یونجه و کود تریپل سوپرفسفات را نشان می‌دهد. ولتاژ خروجی حسگر پیزوالکتریک برای تمامی نرخ‌های مواد دانه‌ای گندم، یونجه و کود تریپل سوپرفسفات در دو حالت استاتیکی و دینامیکی در طول زمان ۳۰ ثانیه برای هر نرخ مشخص از جریان جرمی اندازه‌گیری شده به وسیله ترازو پیروی کرده است.

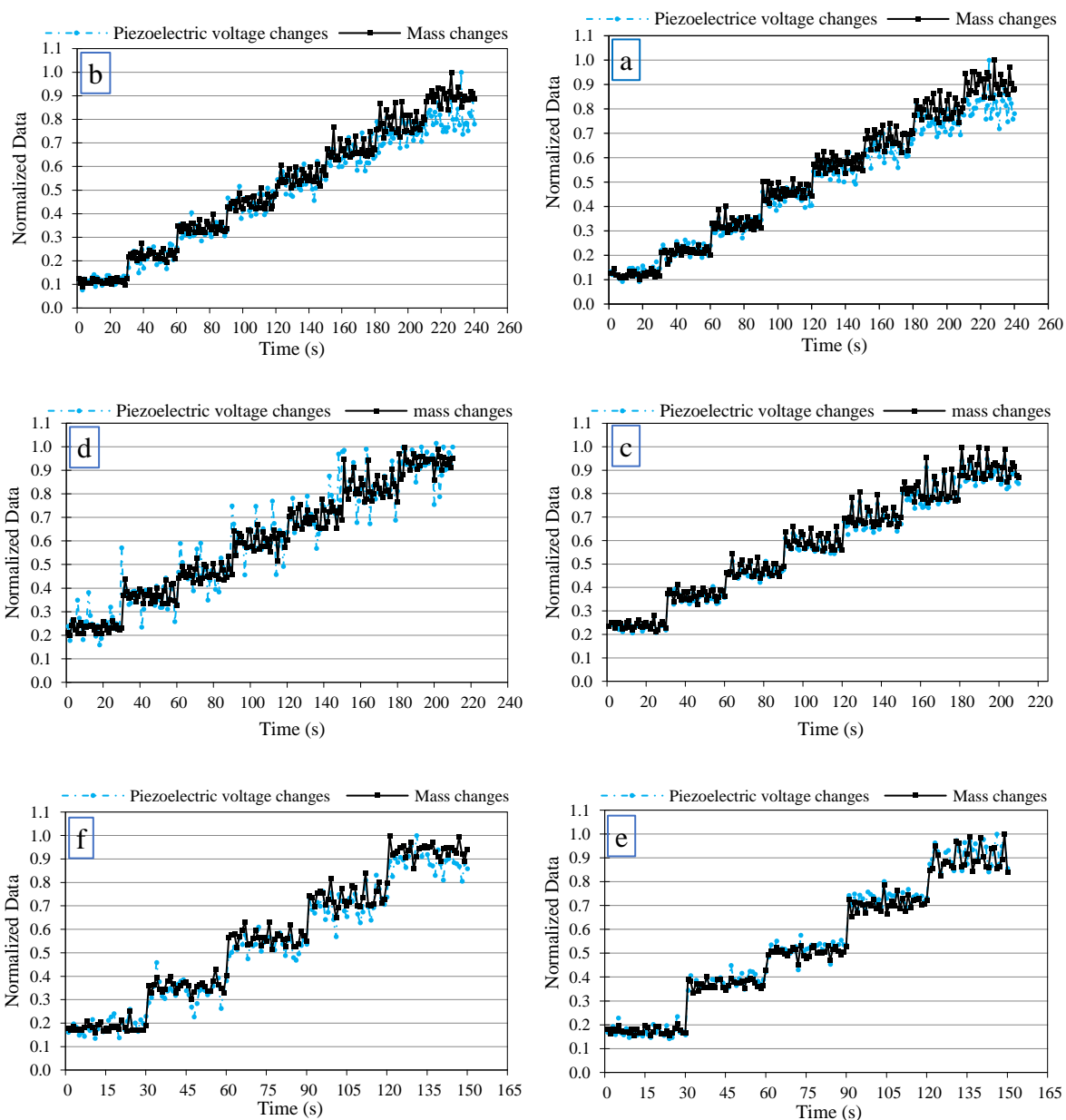
انحراف معیار، به عنوان یک پارامتر آماری، نشانه‌ای در مورد میزان پراکندگی داده‌ها در اطراف میانگین است. تطابق بیشتر بین مقدار انحراف معیار سیگنال نرمال شده دریافتی از هر حسگرها و داده‌های جریان جرمی نرمال شده ترازو در هر نرخ مشخص، روش دقیق‌تری را در تعیین نرخ جریان پیشنهاد می‌کند (Karimi et al., 2017).

با توجه به نمودارهای شکل (۶) انحراف معیار محاسبه شده از سیگنال حسگر پیزوالکتریک و جریان جرمی در نرخ‌های مختلف نشان می‌دهد، که تغییرات در ولتاژ حسگر پیزوالکتریک رابطه‌ی بسیار قوی با تغییرات جریان جرمی در یک نرخ دارد. تماسی بودن حسگر پیزوالکتریک باعث می‌شود تماس‌های لحظه‌ای مواد دانه‌ای در هر نرخ مشخص متناسب با تماس‌ها و تغییرات لحظه‌ای ترازو باشد و تناسب بیشتری از انحراف معیار بین ولتاژ دریافتی از حسگر و جریان جرمی را در یک نرخ به وجود بیاورد.

جدول (۳) برازش خطی بین ولتاژ خروجی حسگر پیزوالکتریک و داده‌های جریان جرمی ترازو را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج واسنجی، ضرایب تبیین برای بذره‌های گندم و یونجه و کود تریپل سوپرفسفات به ترتیب ۰/۹۸۳، ۰/۹۹۴ و ۰/۹۸۹ به دست آمد. افزایش حساسیت حسگر پیزوالکتریک برای بذر یونجه موجب شد که تشخیص بذرها به وسیله حسگر به آسانی صورت گیرد. در عین حال افزایش

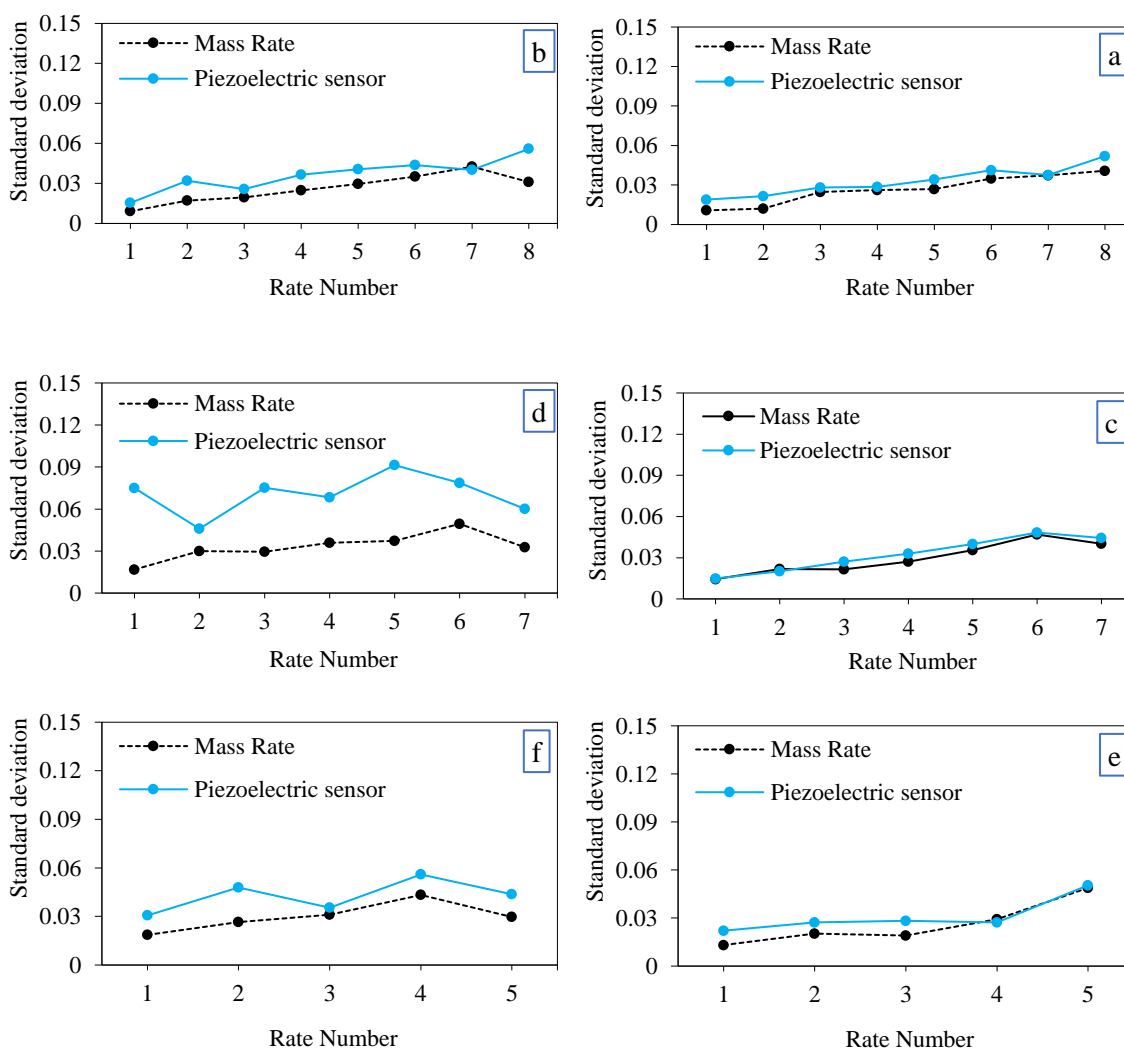
حساسیت حسگر برای بذر یونجه باعث شد لرزش‌ها و نویزهای حاصله از پایه‌ی ارتعاشی روی عملکرد حسگر تأثیر منفی بگذارد، که این مورد باید در مرحله اعتبارسنجی حسگر بررسی شود. داده‌های این بخش حاصل میانگین داده‌ها در ۴ تکرار می‌باشند. باتوجه به نتایج، حسگر پیزوالکتریک روابط خطی بسیار خوبی را برآزش کرده است.

برای اعتبارسنجی حسگر پیزوالکتریک و رابطه بین نرخ جریان جرمی اندازه‌گیری شده به‌وسیله‌ی حسگر و ترازو، رگرسیون خطی بین این دو متغیر در دو حالت استاتیکی و دینامیکی برای دو نوع بذر گندم، یونجه و کود تریپل سوپرفسفات به‌دست آمد. در جدول (۳) ضرایب تبیین بین این دو متغیر، میانگین مربعات خطا^۱، میانگین درصد خطای مطلق^۲ و میانگین انحراف خطا^۳ برای بذرهای گندم، یونجه و کود تریپل سوپر فسفات آمده است. داده‌های این بخش حاصل میانگین داده‌ها در دو تکرار می‌باشند.



شکل ۵. نمودار جریان جرمی و سیگنال حسگر پیزوالکتریک (a) بذر گندم در حالت استاتیکی، (b) بذر گندم در حالت دینامیکی، (c) بذر یونجه در حالت استاتیکی، (d) بذر یونجه در حالت دینامیکی، (e) کود تریپل سوپرفسفات در حالت استاتیکی و (f) کود تریپل سوپرفسفات در حالت دینامیکی.

1. Root Mean Square Error
2. Mean Absolute Percentage Error
3. Mean Bias Error



شکل ۶. نمودار انحراف معیار جریان جرمی و سیگنال حسگر پیزوالکتریک (a) بذر گندم در حالت استاتیکی، (b) بذر گندم در حالت دینامیکی، (c) بذر یونجه در حالت استاتیکی، (d) بذر یونجه در حالت دینامیکی، (e) کود تریپل سوپرفسفات در حالت استاتیکی و (f) کود تریپل سوپرفسفات در حالت دینامیکی.

باتوجه به نتایج واسنجی حسگر پیزوالکتریک در جدول (۳) ضرایب تبیین برای بذر گندم در حالت استاتیکی و دینامیکی به ترتیب ۰/۹۵۲ و ۰/۹۳۱ به دست آمد. با توجه به دقت بالای به دست آمده، حسگر پیزوالکتریک توانایی تشخیص نرخ‌های مختلف جریان جرمی گندم در حالت استاتیکی و دینامیکی دارد. اگرچه حالت استاتیکی به مراتب بهتر از حالت دینامیکی عمل کرده است. دلیل آن تأثیر گذاری سینماتیکی پایه‌ی ارتعاشی بر روی حسگر پیزوالکتریک و همچنین عوامل محیطی می‌باشد. ضرایب تبیین برای بذر یونجه در حالت استاتیکی و دینامیکی به ترتیب ۰/۹۹۱ و ۰/۸۵۶ به دست آمد. ضریب تبیین به دست آمده در حالت استاتیکی نشان می‌دهد که حسگر قابلیت تشخیص و پایش جریان‌های جرمی مختلف بذر یونجه را با دقت بسیار بالا دارد. اما در حالت دینامیکی بسیار ضعیف‌تر از حالت استاتیکی است، که دلایل آن افزایش حساسیت حسگر به دنبال آن تقویت نویزهای محیط و ارتعاشات حاصل از پایه‌ی ارتعاشی می‌باشد. مقدار میانگین درصد خطای مطلق برای ترازو و حسگر پیزوالکتریک در اندازه‌گیری نرخ‌های مختلف جریان جرمی بذر یونجه در حالت استاتیکی و دینامیکی به ترتیب ۲۱/۵۷ و ۲/۵۶ درصد به دست آمد، که این مقدار در حالت دینامیکی بسیار بیشتر از حالت استاتیکی است که دلایل آن در بالا ذکر شد. ضرایب تبیین برازش برای کود تریپل سوپرفسفات در حالت استاتیکی و دینامیکی به ترتیب ۰/۹۷۹ و ۰/۹۷۸ به دست آمد. برازش این دو متغیر در دو حالت استاتیکی و دینامیکی نشان از حساسیت و دقت بالای حسگر در تشخیص نرخ‌های مختلف جریان جرمی کود تریپل سوپرفسفات دارد. نتایج حاصل از اعتبار سنجی نشان می‌دهد که حسگر پیزوالکتریک قادر به تشخیص نرخ‌های مختلف جریان جرمی بذرهای گندم، یونجه و کود تریپل سوپرفسفات در هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی می‌باشد.

جدول ۳. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی حسگر پیزوالکتریک برای مواد دانه‌ای مختلف.

مقادیر ارزیابی برای مواد مختلف					
کود تریپل سوپرفسفات		یونجه		گندم	
$Mr^* = 2/845 \times V - 0/1739$		$Mr = 1/574 \times V - 0/008$		$Mr = 2/396 \times V - 0/5029$	
۰/۹۸۹		۰/۹۹۴		۰/۹۸۳	
مدل پیشینی		مدل پیشینی		مدل پیشینی	
R^2 - واسنجی		R^2 - واسنجی		R^2 - واسنجی	
شرایط ارزیابی		شرایط ارزیابی		شرایط ارزیابی	
R^2 - اعتبارسنجی		R^2 - اعتبارسنجی		R^2 - اعتبارسنجی	
RMSE (g/s)		RMSE (g/s)		RMSE (g/s)	
MAPE (%)		MAPE (%)		MAPE (%)	
MBE (g/s)		MBE (g/s)		MBE (g/s)	

* Mr نرخ جریان جرمی ($g s^{-1}$) و V خروجی حسگر پیزوالکتریک (v) است.

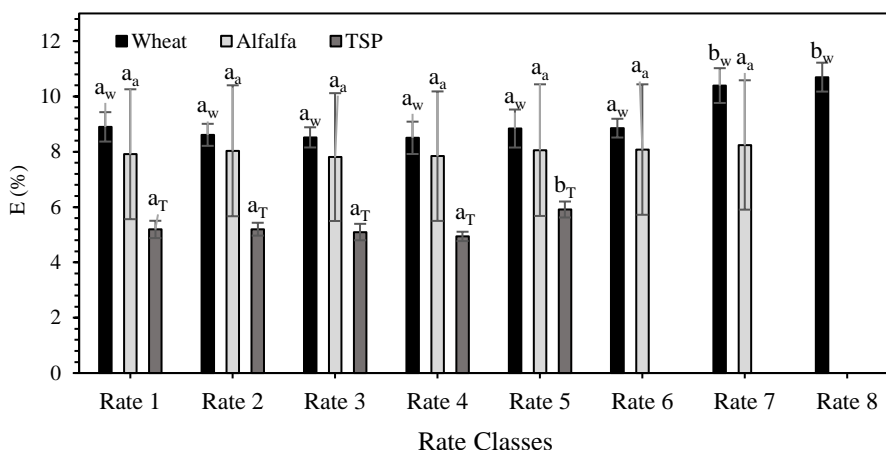
برای بیان بهتر نتایج اثر دو شرایط کاری حسگر (استاتیکی و دینامیکی) و سطوح دبی جرمی برای هر سه مواد مورد آزمایش (بذر گندم، بذر یونجه و کود تریپل سوپرفسفات) روی درصد خطای حسگر انجام شد، که نتایج تجزیه واریانس مربوط به این آزمایش در جدول (۴) آمده است. داده‌های این بخش حاصل میانگین داده‌ها در ۳ تکرار می‌باشند.

جدول ۴. تجزیه واریانس اثر شرایط ارزیابی استاتیکی و دینامیکی و سطوح دبی جرمی روی درصد خطای حسگر برای دو نوع بذر گندم و یونجه و کود تریپل سوپرفسفات.

کود تریپل سوپرفسفات		یونجه		گندم		منابع تغییر
Sig.	F	Sig.	F	Sig.	F	
۰/۰۰۰	۲۵/۴۰۹**	۰/۰۰۰	۶۳۴۳/۳**	۰/۰۰۰	۱۸/۱۱۴**	شرایط (استاتیکی-دینامیکی)
۰/۰۳۵	۳/۱۹۳*	۰/۶۹۲	۰/۶۴۷ ^{ns}	۰/۰۱۳	۳/۱۱۰*	دبی جرمی
۰/۶۴۲	۰/۶۳۷ ^{ns}	۰/۹۹۷	۰/۰۸۶ ^{ns}	۰/۸۲۵	۰/۵۰۴ ^{ns}	اثر متقابل (دبی*شرایط)

** معنی‌داری در سطح ۰/۰۱، * معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ و ns بی‌معنی

با توجه به جدول (۴) برای هر سه نوع مواد عبور داده شده از حسگر، اثر ارتعاش سامانه روی دقت حسگر در سطح احتمال ۰/۰۱ درصد معنی‌دار بود. با توجه به مقایسه میانگین دانکن اثر شرایط استاتیکی و دینامیکی برای تمام مواد مورد آزمایش در سطح احتمال ۰/۰۵ درصد معنی‌دار بود. مقادیر میانگین درصد خطا در دو شرایط استاتیکی و دینامیکی برای بذر گندم به ترتیب ۸/۴۲ و ۹/۹۱ درصد، برای بذر یونجه به ترتیب ۲/۲۶ و ۱۳/۷۴ درصد و برای کود تریپل سوپرفسفات به ترتیب ۴/۸۰ و ۵/۷۴ درصد بود. همانطور که مشخص است، اثر پایه ارتعاشی روی دقت حسگر برای بذر یونجه بسیار چشمگیر بود. همانطور که قبلاً بیان شد این به دلیل افزایش حساسیت حسگر برای اندازه‌گیری دبی بذر یونجه بود. با وجود معنی‌داری اثر پایه ارتعاشی روی خطای حسگر برای بذر گندم و کود تریپل سوپرفسفات، درصد خطای حسگر برای آن‌ها در هر دو شرایط پایین بود و می‌توان اظهار داشت که حسگر به خوبی قادر به اندازه‌گیری دبی جرمی بذر گندم و کود تریپل سوپرفسفات در هر دو شرایط دینامیکی و استاتیکی بود. با توجه به جدول (۴) اثر سطوح دبی جرمی برای بذر گندم و کود تریپل سوپرفسفات در سطح احتمال ۰/۰۵ درصد معنی‌دار بود و برای بذر یونجه بی‌معنی بود. برای تجزیه و تحلیل بهتر این نتیجه آزمون مقایسه میانگین دانکن در سطح احتمال ۰/۰۵ درصد انجام شد (شکل ۷). با توجه به اینکه سطوح دبی جرمی برای هر یک از مواد مورد آزمایش به صورت خاص خود بود (برای بذر گندم در ۸ نرخ از ۲/۶۵ الی ۱۹/۰۲ گرم بر ثانیه، برای بذر یونجه در ۷ نرخ از ۰/۴۲ الی ۱/۵۷ گرم بر ثانیه و برای کود تریپل سوپرفسفات در ۵ نرخ از ۳/۷۵ الی ۱۹/۱۹ گرم بر ثانیه)، روی شکل (۷) مقایسه‌ها برای هر ماده به صورت جداگانه بررسی شده است و با اندیس حروف اول انگلیسی هر ماده مشخص شده است.



شکل ۷. مقایسه میانگین دانکن در سطح احتمال ۰/۰۵ درصد برای اثر سطوح دبی جرمی روی درصد خطای حسگر برای بذر گندم در ۸ نرخ و بذر یونجه در ۷ نرخ و کود تریپل سوپرفسفات در ۵ نرخ- روی شکل مقایسه‌ها برای هر مواد به صورت جداگانه بررسی شده است و با اندیس حروف اول انگلیسی هر مواد مشخص شده است.

با توجه به نتایج مقایسه میانگین برای هر سه مواد مورد آزمایش، دقت حسگر در دبی‌های جرمی پایین بهتر بود. این نتیجه برای بذر گندم نشان داد که خطای حسگر برای ۶ نرخ اول ثابت بود و در دو نرخ دبی جرمی ۷ و ۸ که در یک سطح قرار داشتند، خطای حسگر افزایش یافت. برای کود تریپل سوپرفسفات خطای حسگر برای ۴ نرخ اول ثابت بود و در نرخ ۵ اندکی بالا رفت که باعث شد تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۵ با ۴ نرخ اول داشته باشد. با توجه به شکل (۷) خطای انحراف استاندارد داده‌ها برای بذر یونجه از همه بیشتر بود که این به دلیل تأثیر پایه ارتعاشی روی حسگر برای بذر یونجه بود.

بحث

همان‌طوری که در شکل‌های (a-۵)، (b-۵)، (e-۵) و (f-۵) مشاهده می‌شود، با افزایش نرخ‌های مختلف جریان جرمی، تغییر در ولتاژ خروجی حسگر پیزوالکتریک به خوبی قابل مشاهده و تفکیک است، با توجه به نتایج مقایسه میانگین این تفکیک برای بذر گندم از ۰/۲۳ ± ۲/۶۵ تا ۰/۷۸ ± ۱۴/۲۲ گرم بر ثانیه معادل ۸۰/۱۶ ± ۱۱/۵۶ تا ۴۳۰/۱۸ ± ۲۳/۵۹ کیلوگرم در هکتار و برای کود تریپل سوپرفسفات از ۳/۰ ± ۷۵/۴۲ تا ۱۵/۱۴ ± ۰/۶۳ گرم بر ثانیه معادل ۱۱۳/۴۴ ± ۱۰/۲۷ تا ۴۵۸/۰۱ ± ۱۸/۷۵ کیلوگرم در هکتار در سرعت پیشروی ۷ کیلومتر بر ساعت و فاصله بین ردیف کاشت ۱۷ سانتی‌متر ادامه داشته و بعد از آن از قابلیت تشخیص نرخ کاسته شده است. از آنجا که نرخ کاشت بذر گندم به ندرت به ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار می‌رسد و به همین شکل محدوده‌ی پخش کود تریپل سوپرفسفات به ندرت به رگم ۴۵۰ کیلوگرم در هکتار می‌رسد، به نظر می‌رسد که محدوده‌ی کارایی این حسگر قابل اطمینان است. بنابراین از این حسگر می‌توان برای پایش جریان جرمی در بذرکاری گندم و انواع کودهای شیمیایی گرانوله به خوبی استفاده کرد. در نرخ‌های بالا حجم زیاد مواد دانه‌ای و متناسب با آن چگالی و وزن بیشتر مواد در هنگام برخورد به سرامیک پیزوالکتریک باعث شده است که حسگر قادر به پایش نرخ‌های بالاتر از دامنه‌های ذکر شده نباشد. ضمن تفاوت این روش اندازه‌گیری با حسگرهای نوری مورد بررسی در پژوهش Karimi et al. (2017)، با توجه به نتایج، دقت حسگر طراحی شده در پژوهش حاضر از حسگر IR معرفی شده در پژوهش ایشان بهتر بود.

در آزمایش‌ها برای بذر یونجه میزان حساسیت حسگر نسبت به بذر گندم و کود تریپل سوپرفسفات به‌وسیله‌ی پتانسیومتر افزایش یافته است. ریز بودن بذر یونجه، عدم یکنواختی چگالی بذرهای یونجه، گندم و کود تریپل سوپرفسفات و همچنین عدم یکنواختی سرعت ریزش (سقوط) بذر و کود در جریان‌های جرمی مختلف، داده برداری برای هر سه ماده در یک حساسیت ثابت حسگر را میسر نمی‌کرد. به‌گونه‌ای که ولتاژ تولید شده ناشی از ضربات دانه‌های گندم، یونجه و کود تریپل سوپرفسفات متفاوت است. افزایش حساسیت موجب شد تا حسگر به راحتی نرخ‌های مختلف ریزش بذر یونجه را تشخیص دهد. با این حال افزایش حساسیت حسگر در حالت دینامیکی باعث شد تا نویزها و لرزش‌های حاصل از پایه‌ی ارتعاشی روی خروجی حسگر تأثیر منفی داشته باشد (کاهش نسبت سیگنال به نویز) (Gierz & Paszkiewicz, 2020). همانطور که از نمودار شکل‌های (c-۵) و (d-۵) پیداست، برای بذر یونجه نوسان‌های اندازه‌گیری داده‌ها در حالت دینامیکی به نسبت حالت استاتیکی بیشتر است که دلیل آن تأثیرات پایه‌ی ارتعاشی روی آن می‌باشد. (Zhao et al. (2011) در طراحی

سامانه پایش جداسازی تلفات دانه از نوع پیژوالکتریک اظهار داشتند که ولتاژ سیگنال‌های تولید شده ناشی از ضربات دانه و کاه و کلش به لحاظ اندازه و فرکانس بسیار متفاوت است. نتایج کار این گروه نشان داد که فرکانس و بزرگی ولتاژ تولیدی ناشی از دانه بیش‌تر از کاه و کلش بود، که دلیل آن را چگالی بیشتر دانه نسبت به کاه و کلش بیان کردند. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که لرزش‌های کم‌باین بر ولتاژ خروجی حسگر پیژوالکتریک تأثیر معنی‌داری داشته است.

با توجه به نمودارهای شکل (۶) برای هر سه مواد گندم، یونجه و کود تریپل سوپرفسفات در نرخ‌های بالا (به‌عنوان مثال نرخ ۸ برای گندم، نرخ ۷ برای یونجه و نرخ ۵ برای کود تریپل سوپرفسفات) مقدار انحراف معیار بیشتری برای داده‌ها مشاهده شد. این نتیجه به دلیل نوسانات بده جرمی و تماسی بودن حسگر پیژوالکتریک و ترازو پیش‌بینی شد. مقدار انحراف معیار در حالت دینامیکی برای هر سه ماده‌ی آزمایشی گندم، یونجه و کود تریپل سوپرفسفات بیشتر از حالت استاتیکی است. به عبارتی تغییرات در هر نرخ از جریان جرمی در حالت دینامیکی بیشتر از حالت استاتیکی است، که دلیل آن تأثیرات پایه‌ی ارتعاشی روی عملکرد حسگر پیژوالکتریک است. اگرچه Goulden & Mason (1958) در پژوهش خود توانستند ۲۰۰ الی ۳۰۰ دانه بذر کتان را در دقیقه اندازه‌گیری کنند، اما این برای محدوده کاری خطی کارها کاملاً غیرقابل قبول است. در این پژوهش با توسعه یک حسگر پیژوالکتریک و تقویت و نویزگیری ولتاژ خروجی آن، به خوبی دبی جرمی سه نوع مواد گرانوله ذکر شده در محدوده کاری خطی کارها پایش شد. در پژوهش Gierz & Paszkiewicz (2020) نیز با وجود دقت اندازه‌گیری خوب حسگر پیژوالکتریک در شمارش تعداد دانه‌ها، اما برای پایش توده جریان جرمی توسعه داده نشد.

با توجه به نتایج تمام سطوح جریان‌های جرمی بذر یونجه به‌وسیله حسگر پیژوالکتریک در حالت استاتیکی و دینامیکی از هم قابل تفکیک هستند. نوسان‌های اندازه‌گیری داده‌ها در حالت دینامیکی به نسبت حالت استاتیکی بیشتر است، که همان‌طور که قبلاً نیز مورد اشاره قرار گرفت، دلیل آن تأثیرات پایه‌ی ارتعاشی روی سامانه‌ی ارزیابی و حسگر پیژوالکتریک است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، داده‌های ولتاژی خروجی حسگر پیژوالکتریک به خوبی از تغییرات جریان جرمی ترازو در داخل یک نرخ مشخص پیروی کرده است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش یک حسگر ضربه‌ای مبتنی بر حسگر پیژوالکتریک برای اندازه‌گیری دبی جرمی لوله سقوط خطی کارها به طور کامل طراحی و ساخته شد و برای نرخ‌های مختلف ریزش دو نوع بذر گندم و یونجه و کود تریپل سوپرفسفات در دو حالت استاتیکی و دینامیکی ارزیابی شد. جریان جرمی کود سوپرفسفات تریپل در ۵ نرخ جریان جرمی از $3/42 \pm 1/22$ تا $19/3 \pm 0/95$ گرم بر ثانیه، جریان جرمی بذر گندم در ۸ نرخ جریان جرمی از $2/55 \pm 0/23$ تا $19/02 \pm 0/86$ گرم بر ثانیه و جریان جرمی بذر یونجه در ۷ نرخ جریان جرمی از $0/42 \pm 0/02$ تا $1/0 \pm 6/08$ گرم بر ثانیه در مدت زمان ۳۰ ثانیه برای هر نرخ در لوله سقوط واحد خطی کار به‌صورت استاتیکی و دینامیکی به‌وسیله‌ی حسگرهای خازنی و پیژوالکتریک اندازه‌گیری شد. حساسیت حسگر طراحی شده قابل تغییر بود، که برای محصولات دانه‌ای مختلف با در نظر گرفتن نسبت سیگنال به نویز حساسیت آن قابل تنظیم بود. سیگنال (ولتاژ) دریافتی از حسگر پیژوالکتریک با میزان تغییرات دبی جریان جرمی بذر و کود رابطه خطی دارد. حسگر نرخ جریان جرمی برای بذر گندم $14/22 \pm 0/78$ گرم بر ثانیه معادل $430/18 \pm 23/59$ کیلوگرم در هکتار و برای کود تریپل سوپرفسفات تا $15/14 \pm 0/63$ گرم بر ثانیه معادل $458/01 \pm 18/75$ کیلوگرم در هکتار در سرعت پیشروی ۷ کیلومتر بر ساعت را به خوبی پایش کرد، که این در محدوده عملکرد خطی کارها است. برای بذر یونجه لازم بود حساسیت حسگر بالا برود، که این باعث شد پایش جریان جرمی بذر یونجه در محدوده ارزیابی شده در شرایط استاتیکی به خوبی صورت بگیرد، اما ارزیابی حسگر در حالت دینامیکی به دلیل کاهش دامنه سیگنال به نویز و تأثیر پایه ارتعاشی روی دقت حسگر همراه با نویز بود. حسگر توسعه یافته می‌تواند نرخ جریان واقعی بذر و کود را برای کنترل مقدار کاشت و یکنواختی، بازخورد دهد و همچنین با مجهز کردن خطی کار به سامانه موقعیت یاب جغرافیایی می‌توان یک نقشه تجویز نرخ جریان بذر برای فعالیت‌های کشاورزی بعدی را تولید نمود.

پیشنهاد می‌شود آزمون مزرعه‌ای حسگر انجام بگیرد و این حسگر در کارنده‌ها و کودکارهای مجهز به سامانه‌های نرخ متغیر به‌عنوان سیگنال بازخورد به‌کارگرفته شود. توسعه و استفاده از تقویت کننده مناسب امکان تشخیص دقیق ضربه و بهبود ویژگی‌های فرکانس سامانه را فراهم می‌کند (Tothill, 2001).

منابع

محمدی، فرزاد؛ ملکی، محمد رضا؛ رنجبری، سلمان و خدائی، جلال (۱۳۹۹). اندازه‌گیری برخط سطح بذر و کود مخزن خطی کارها با استفاده از روش

مادون قرمز، پژوهش‌های مکانیک مائسین‌های کشاورزی، ۹ (۲)، ۹۵-۱۰۵.

محمدی، فرزاد؛ موسی‌زاده، حسین و جعفری، علی (۱۴۰۲). اندازه‌گیری بلادرنگ دبی جرمی مواد جامد فله‌ای مبتنی بر نیروی مرکزگرا. پژوهش‌های مکانیک مائسین‌های کشاورزی، ۱۱ (۴)، ۲۰-۱۰.

موسی‌زاده، حسین؛ طریبی، نازیلا؛ تقی‌زاده طامه، جلیل؛ محمدی، فرزاد و کیایی، علی (۱۴۰۲). بررسی تاثیر مش‌بندی بر توزیع پتانسیل میدان در توموگرافی خازنی با قابلیت کاربرد در سامانه اندازه‌گیری دبی جرمی در کمباین غلات، نشریه مکانیزاسیون کشاورزی، ۸ (۱)، ۳۱-۲۳.

REFERENCES

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.09.005>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.11.015>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.01.050>
- 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. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 78(3), 291-297. <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0603>.
- 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.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.041>.
- 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 Wileyandsonns, 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. <https://doi.org/10.13031/2013.23482>.
- Chen, Q. X. & Payne, P. A. (1995). Industrial applications of piezoelectric polymer transducers. *Measurement Science and Technology*, 6(3), 249-267. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/6/3/001>.
- Coulthard, J., Byrne, B. & Yan, Y. (1991). Non-restrictive measurement of solids mass flow rate in pneumatic conveying systems. *Measurement and Control*, 24, 113-119.
- Dursun, E. & Dursun, I. (2005). Some physical properties of caper seed. *Biosystems Engineering*, 92(2), 237-245. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.06.003>.
- Ghasemi, M.G., Mobli, H., Jafari, A., Keyhani, A.R., Soltanabadi, M.H. & Rafiee, S. (2008). Some physical properties of rough rice (*Oryza Sativa* L) Grain. *Journal of Cereal Science*, 47, 496-501. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.05.014>.
- Gierz, L. & Paszkiewicz, B.K. (2020). PVDF piezoelectric sensors for seeds counting and coulter clogging detection in sowing process monitoring. *Journal of Engineering*, 1, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2020/2676725>.
- Goulden, C. H. & Mason, W.J. 1958. An electronic seed counter. *Canadian Journal of Plant Science*, 38(1), 84-87.
- Huang, D., Jia, H., Qi, Y., Zhu, L. & Li, H. (2013). Seeding monitor system for planter based on polyvinylidene fluoride piezoelectric film. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 29(23), 15-22.
- Hu, H.L., Xu, T.M., Hui, S.E. & Zhou, Q.L. (2006). A novel capacitive system for the concentration measurement of pneumatically conveyed pulverized fuel at power stations. *Flow Measurement and Instrumentation*, 17(2), 87-92. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2005.11.001>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.04.022>.
- Karayel, D. & Ozmerzi, A. (2002). Effect of tillage methods on sowing uniformity of maize. *Canadian Biosystems Engineering*, 44(2), 23-26.
- Karimi, H., Navid, H. & Mahmoudi, A. (2015). Online laboratory evaluation of seeding-machine application by an acoustic technique. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 13(1), 0202.



<https://doi.org/10.5424/sjar/2015131-6050>.

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.08.027>.
- Klemme, K.A., Joseph, A., Schumacher, J.A. & Froehlich, D.P. (1992). Results and advantages of a specially 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.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.03.013>.
- Lee, W. S., Alchanatis, V., Yang, C., Hirafuji, M., Moshou, D. & Li, C. (2010). Sensing technologies for precision specialty crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74(1), 2-33. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.08.005>.
- Li, M., Wang, Y., Guo, H., Ding, F. & Yan, H. (2023). Evaluation of variable rate irrigation management in forage crops: Saving water and increasing water productivity. *Agricultural Water Management*, 275, 108020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108020>.
- Liptak, b. (2003). *Instrument Engineers' Handbook. Process Measurement and Analysis*, 5th Edition, America: CRC Press.
- Liu, W., Hu, J., Zhao, X., Pan, H., Lakhiar, I.A. & Wang, W. (2019). Development and experimental analysis of an intelligent sensor for monitoring seed flow rate based on a seed flow reconstruction technique. *Computers and Electronics in Agriculture*, 164, 104899. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104899>.
- Maleki, M.R., Mouazen, A.M., Ketelaere, B.D., Ramon, H. & De Baerdemaeker, J. (2008). On-the-go variable-rate phosphorus fertilisation based on a visible and near-infrared soil sensor. *Biosystems Engineering*, 99(1), 35-46. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.09.007>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.07.016>.
- 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. <https://doi.org/10.1109/ICSE.2003.1201194>.
- Maung, C.O., Kawashima, D., Oshima, H., Tanaka, Y., Yamane, Y. & Takei, M. (2020). Particle volume flow rate measurement by combination of dual electrical capacitance tomography sensor and plug flow shape model. *Powder Technology*, 364, 310-320. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.01.084>.
- Mohammadi, F., Maleki, M.R. & Jalal Khodaei. (2022). Control of variable rate system of a rotary tiller based on real-time measurement of soil surface roughness. *Soil and Tillage Research*, 215, 105216. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105216>.
- Mohammadi, F., Maleki, M.R., Ranjbari, S. & Khodaei, j. (2020). On-line measurement of seed and fertilizer level in drills hopper using Infrared method. *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*, 9(2), 95-105. (In Persian).
- Mohammadi, F., Mousazadeh, H. & Jafari, A. (2023). Online measurement of bulk solids mass flow rate based on centripetal force. *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*, 11(4), 10-20. (In Persian).
- 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. <https://doi:10.1002/food.19870310724>.
- Mousazadeh, H., Tarabi, N., Taghizadeh-Tameh, J., Mohammadi, F. & Kiapei, A. (2023). Mass Flow Rate Measurement Based on Electrical Capacitance Tomography with Feasibility Application in Cereal Combines and Assessment of Discretization on Field Potential. *Agricultural Mechanization*, 8(1), 23-31. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/jam.2023.53762.1202>
- Norden, K.E. (1998). *Handbook of Electronic Weighing*. Wiley-VCH, 1st edition, 488 pp.
- Reid, W. S., Buckley, D. J. & Mason, W. (1976). A Photoelectric seed counting detector. *Applied Engineering in Agriculture*, 21(2), 213-215. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(76\)90077-9](https://doi.org/10.1016/0021-8634(76)90077-9).
- 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 & Tillage Research*, 196, 104351. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104351>.
- 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.

- Seminara, L., Capurro, M., Cirillo, P., Cannata, G. & Valle, M. (2011). Electromechanical characterization of piezoelectric PVDF polymer films for tactile sensors in robotics applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 169(1), 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.05.004>.
- 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. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/18/11/004>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.07.002>.
- Tewari, V.K., Pareek, C.M., Lal, G., Dhruw, L.K. & Singh, N. (2020). Image processing based real-time variable-rate chemical spraying system for disease control in paddy crop. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 4, 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2020.01.002>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.101986>
- Tothill, I. E. (2001). Biosensors developments and potential applications in the agricultural diagnosis sector. *Computers and Electronics in Agriculture*, 30(1–32), 05–218. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(00\)00165-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(00)00165-4).
- Wagner, L.E. & Shrock, M.D. (1989). Yield determination using a pivoted auger flow sensor. *American Society of Agricultural Engineers*, 32(2), 409-413. <https://doi.org/10.13031/2013.31018>.
- Wang, H., Gu, Z., Xu, J., Li, S., Qi, Z., Li, Y. & Zhou, J. (2022). Automatic variable rate fertilisation system for improved fertilisation uniformity in paddy fields. *Biosystems Engineering*, 219, 56-57. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.04.021>
- Xie, C., Zhang, D., Yang, L., Cui, T., He, X. & Du, Z. (2021). Precision seeding parameter monitoring system based on laser sensor and wireless serial port communication. *Computers and Electronics in Agriculture*, 190, 106429. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106429>
- Xie, C., Zhang, D., Yang, L., Cui, T., Yu, T., Wang, D. & Xiao, T. (2021). Experimental analysis on the variation law of sensor monitoring accuracy under different seeding speed and seeding spacing. *Computers and Electronics in Agriculture*, 189, 106369. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106369>
- Yatskul, A., Lemiere, J.-P. & Cointault, F. (2017). Influence of the divider head functioning conditions and geometry on the seed's distribution accuracy of the air-seeder. *Biosystems Engineering*, 161, 120–134. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.015>.
- Zhao, Z., Li, Y., Chen, J. & Xu, J. (2011). Grain separation loss monitoring system in combine harvester. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76(2), 183-188. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.01.016>.
- Yu, H., Ding, Y., Fu, X. Liu, H., Liu, H., Jin, M., Yang, C. Liu, Z., Sun, G. & Dou, x. (2019). A solid fertilizer and seed application rate measuring system for a seedfertilizer drill machine. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 836-844. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.007>
- Zhang, P., Yang, Y., Huang, Z., Sun, J., Liao, Z., Wang, J. & Yang, Y. (2021). Machine learning assisted measurement of solid mass flow rate in horizontal pneumatic conveying by acoustic emission detection. *Chemical Engineering Science*, 229, 116083. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.116083>
- Zhang, X., Liu, J. & He, B. (2014). Magnetic Resonance Based Electrical Properties Tomography: A Review. *IEEE Reviews In Biomedical Engineering*, 7, 87-96. [10.1109/RBME.2013.2297206](https://doi.org/10.1109/RBME.2013.2297206)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2005.07.012>
- Zheng, Y. & Liu, Q. (2011). Review of techniques for the mass flow rate measurement of pneumatically conveyed solids. *Measurement*, 44, 589-604.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.09.087>



Real-time monitoring of the mass flow rate of granular materials in the seeder tube using a piezoelectric sensor

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

In the modern agriculture, the two key issues determining the economic efficiency of arable land and industrial equipment utilization are the challenge of obtaining a uniform grain distribution over the entire field and the detection of drill tube clogging (Yatskul et al., 2017). Solving both issues allow for increasing the efficiency of food production while reducing the use of herbicides, seeds, fertilizers, and water. Practically, since grains move in a dense state, it is difficult to measure accurate grains flow rate. While optical measurement methods have been used to monitor the mass flow of seeds (Besharati et al., 2019), However, due to the existence of dust inside the drill tube, they are not reliable enough. As an alternative, a piezoelectric sensor can be used to measure the flow rate of seeds or granular fertilizers. Nevertheless, literature review shows that few research works utilized piezoelectric sensors for this purpose (Seminara et al., 2011; Maleki et al. 2008). Therefore, in this study, a measuring system was developed to monitor the mass flow of granular materials in the drill applicator's tube.

Materials and Methods

A laboratory set-up was developed to measure the mass flow of granular materials, avoiding the potential error available under field conditions. It consisted of a piezoelectric impact plate installed beneath a drill tube. To simulate the field condition, a vibratory stand was designed according to the drill oscillating, while traveling across the field. Then triple superphosphate in 5 application rates from 3.42 ± 1.22 to 19.3 ± 0.95 g/s, wheat seed in 8 application rates from 2.65 ± 0.23 to 19.02 ± 0.86 g/s, and alfalfa seed in 7 application rates from 0.42 ± 0.02 to 1.6 ± 0.08 g/s in 30 s time lap were measured in both static and dynamic conditions. The sensor performance in seed flow measurement would be appropriate if changes in obtained voltage data set from the sensor comply with granular grains mass changes measured by the digital scale. The standard deviation index was employed to evaluate the sensor performance in the instantaneous detection of mass flow rates.

Results and Discussion

The results showed that the mass flow was correlated with piezoelectric sensor signals for all examined materials. The sensor could monitor the mass flow rates of wheat ($R^2=0.98$), alfalfa ($R^2=0.99$), and triple superphosphate fertilizer ($R^2=0.99$) both in static and dynamic conditions. According to the results, the sensor could effectively measure the mass flow both under static and dynamic conditions for wheat seeds from 2.65 ± 0.23 to 14.22 ± 0.78 g/s (80.16 ± 11.56 to 430.18 ± 23.59 kg/ha) and for triple superphosphate fertilizer from 3.75 ± 0.42 to 15.14 ± 0.63 g/s (113.44 ± 10.27 to 458.01 ± 18.75 kg/ha) at speed of 7 km/h and 17 cm inter-row spacing. Also, according to the results obtained, the sensor could effectively measure the mass flow under dynamic condition for alfalfa seeds from 0.42 ± 0.02 to 1.57 ± 0.08 g/s (16.61 ± 0.79 to 62.10 ± 3.16 kg/ha) at speed of 7 km/h and 13 cm inter-row spacing. Since the alfalfa seeds had nearly fine sizes, it was necessary to increase the sensitivity of the sensor, which made it possible to monitor the mass flow well in the static condition, but due to the decrease in the signal-to-noise ratio, the performance of the sensor decreased in the dynamic condition. These results were proved by analysis of variance and compare means test. In addition, the more accurate instantaneous mass flow sensing, the less variation in standard deviation was calculated over the examined time for both sensor and digital scale signals.

Conclusion

The piezoelectric impact sensing system is acceptably used to estimate the seed mass flow rate according to the strong linear relationship between the actual seed mass changes and the system-acquired voltages Results showed that the developed sensor can be used in practical sowing to detect the seed flow rate on grain drills.