

## طراحی، ساخت و ارزیابی حسگر شدت جریان جرمی کمباین غلات

سید محمدرضا ناظم السادات<sup>۱</sup> - محمد لغوی<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۹۰/۱۱/۲۹

تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۰/۳

## چکیده

در سامانه پایش عملکرد محصول غلات، اساسی‌ترین ویژگی محصول در حال برداشت، شدت جریان جرمی دانه تمیز شده ورودی به مخزن می‌باشد. در این تحقیق، حسگری از نوع ضربه‌ای طراحی، ساخت و ارزیابی شد. ابتدا واسنجی حسگر توسط وزنه‌های ۰/۵ kg تا ۴/۵ kg با گام‌های ۰/۵ انجام و خطی بودن واکنش حسگر به نیروهای وارده با ضریب همبستگی ۰/۹۹ اثبات شد. پس از آن، طبق استاندارد ASABE S578 آزمایش حسگر در سه مرحله ۱- در جریان جرمی یکنواخت و ثابت ۲- در جریان جرمی غیر یکنواخت با تغییرات خطی ۳- در جریان جرمی نوسانی انجام شد. نتایج نشان داد که خروجی حسگر ضربه‌ای، تابعی از نرخ جریان گندم (رقم روشن) انتقال یافته است و با افزایش نرخ جریان جرمی، میزان درصد خطای حسگر ضربه‌ای کاهش یافت. به طوری که درصد خطای محاسبه شده در نرخ‌های جریان جرمی ۰/۲۵، ۰/۵۰، ۰/۷۵ و ۱/۰۰٪ ظرفیت (۴/۲۵) کیلوگرم در ثانیه) به ترتیب ۸/۳، ۶/۳، ۵/۲ و ۴/۹ درصد بود. ضریب تبیین بالا ( $R^2 = 0.9975$ ) بین داده‌های تجمعی حسگر ضربه‌ای و مخزن مرجع در نرخ جریان جرمی غیر یکنواخت با تغییرات خطی، حاکی از دقت و حساسیت بالای حسگر ضربه‌ای در سنجش تغییرات جریان جرمی دانه می‌باشد. درصد خطای متوسط حسگر ضربه‌ای در نرخ‌های جریان جرمی غیر یکنواخت، با تغییرات خطی "افزاینده-کاهنده"، "کاهنده-افزاینده" و نوسانی به ترتیب ۸/۶٪، ۸/۳٪ و ۷/۴٪ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: آشکارسازی عملکرد، حسگر جریان جرمی، کشاورزی دقیق، کمباین غلات

## مقدمه

همزمان روی نمایشگر در معرض دید کاربر ماشین برداشت قرار گیرد (Al-Mahasneh and Colvin, 2000).

اجزاء اصلی آشکارسازهای عملکرد لحظه‌ای کمباین غلات عبارت از حسگر جریان دانه، حسگر رطوبت دانه، حسگر سرعت پیشروی، کلید موقعیت سرخوشه چین، ریزپردازنده یا رایانه و نمایشگر می‌باشد (Al-Mahasneh and Colvin, 2000).

حسگرهای سنجش آنی عملکرد محصول که در مقاله‌های علمی گزارش شده است و یا اکنون به صورت تجاری در کشورهای پیشرفته غربی در دسترس کشاورزان می‌باشد، بر اساس اصول و روش‌های مختلفی کار می‌کنند. به طور اجمالی اصول به کار گرفته شده در آن‌ها عبارتند از: حسگر حجم جریان از نوع چرخ پره دار (Schueller et al., 1987; Searcy et al., 1989; Schnug et al., 1993)، هلیس حمل کننده لولایی (Wagner and Schrock, 1989)، حسگر فراصوتی (Klemme et al., 1992)، حسگر ضربه‌ای کرنش سنجی (Vansichen and De Baerdemaeker, 1991; Borgelt, 1993)، حسگر اشعه گاما (Stafford et al., 1991; Massey Ferguson, 1993)، حسگر مادون قرمز (Hummel et al., 1995) و استفاده از اشعه ایکس (Arslan et al., 2000).

مرحله آغازین و پیشرفته‌ترین بخش در چرخه کشاورزی دقیق سیستم آشکارسازی لحظه‌ای عملکرد محصول<sup>۳</sup> می‌باشد که شامل تعدادی حسگر است. هر کدام از حسگرها سنجش و ارسال یک سری اطلاعات از محصول در حال برداشت به ریز پردازنده و یا رایانه را انجام می‌دهد و در نهایت عملکرد محصول در واحد سطح در هر لحظه از برداشت محاسبه می‌گردد. زمانی که داده‌های این سیستم با داده‌های مکانی سامانه مکان یابی افتراقی جهانی<sup>۴</sup> DGPS ادغام شود، این امکان را فراهم می‌آورد که عملکرد محصول بر اساس موقعیت مکانی تعیین و به صورت نقشه عملکرد محصول<sup>۵</sup> ثبت شود و

۱- دانشجوی اسبق کارشناسی ارشد مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه شیراز و عضو هیأت علمی مکانیک خودرو دانشگاه آزاد اسلامی - دانشکده فنی سما - شیراز

۲- استاد گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی - دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز  
(Email: loghavi@shirazu.ac.ir)  
\* - نویسنده مسئول:

3- Instantaneous yield monitoring  
4- Differential Global Positioning System  
5- Yield map

آنها صحت و دقت سیستم آشکارسازی عملکرد را در شرایط مختلف نظیر شدت جریان جرمی یکنواخت و همچنین در شرایط مزارع شیبدار که شبیه سازی می‌شد، بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان دهنده وجود حداکثر خطای ۸ درصدی و حداقل ۰/۱ درصدی در شدت جریان‌های متفاوت برای حسگر عملکرد محصول بود.

در سال ۲۰۰۵ تحقیقاتی در رابطه با توسعه آشکارساز عملکرد غلات در کمباین برداشت ذرت انجام شد (Lida et al., 2005). این کمباین ۴ ردیفه و ساخت شرکت میتسوبیشی ژاپن بود. در سیستم آشکارساز آن از ۲ عدد حسگر جریان جرمی، حسگر رطوبت، سیستم مکان یابی VRS-RTK GPS و سیستم جمع آوری اطلاعات استفاده شده است. از دو حسگر جریان جرمی یکی در بالای دانه تمیز و دیگری در بالای برگشت دانه استفاده گردید. این دو حسگر از نوع ضربه‌ای بودند. هر حسگر ضربه‌ای شامل یک بارسنج و یک صفحه ضربه گیر از جنس پلاستیک بود. آنان روشی را برای مدل سازی جریان دانه پیشنهاد نمودند که با استفاده از تأخیرهای زمانی بتوان نقشه عملکرد محصول غلات را بهبود بخشید.

در تکمیل تحقیق بر روی دستگاه شبیه ساز متحرک آشکارساز عملکرد کمباین غلات، آزمایش‌های دیگری روی حسگر ضربه‌ای نصب شده بر دستگاه، در حالت نرخ جریان جرمی یکنواخت و در شیب‌های مختلف انجام گردید (Loghavi et al., 2007). غله مورد استفاده در این تحقیق ذرت بود. این حسگر پس از ارزیابی از دقت بالایی برخوردار بود و ضریب همبستگی ۰/۹۹ بین داده‌های حسگر و سیستم توزین الکترونیکی مرجع به دست آمد. در پژوهش‌های ذکر شده از حسگرهای جریان جرمی تجاری ساخته شده توسط شرکت های اروپایی و آمریکایی استفاده شده است و غله مورد آزمایش نیز ذرت دانه‌ای بوده که محصول عمده تولیدی آن کشورها می‌باشد. تحقیقات مشابه انجام شده بر روی محصول گندم اندک و محدود است. تحقیقاتی که در رابطه با آشکارسازی عملکرد و تهیه نقشه عملکرد محصولات زراعی در ایران انجام و گزارش شده است بسیار اندک و محدود می‌باشد. در این رابطه عملکرد دستگاه اندازه گیری جریان پیوسته جرمی برای ماشین‌های برآشت محصولات غذای ارزیابی گردیده است (Mostofi Sarkari and Minaei, 2010). آنان دو سامانه اندازه گیر جرمی شامل مبدل‌های یکسر درگیر متصل به مکانیزم تسمه نقاله و بارسنج نگاه‌دارنده وزن کل نقاله تغذیه محصول را مورد ارزیابی و مقایسه آزمایشگاهی و مزرعه‌ای قرار دادند (Mostofi Sarkari et al., 2007; Mostofi Sarkari and Minaei, 2009). در مورد تهیه نقشه عملکرد گندم ساخت، نصب و آزمون حسگر جریان جرمی از نوع صفحه ضربه‌ای بر روی کمباین کلاس مدل (Dominator S-68) در استان خراسان رضوی اجرا و مناسب بودن کارکرد آن گزارش شده است (Nazarzadeh et al., 2010). با توجه به اینکه آشکارسازهای عملکرد محصول غلات در

یکی از انواع حسگرهای شدت جریان جرمی، حسگر نیروی ضربه‌ای می‌باشد. در این حسگر، جریان جرمی، با فنری که نیروی حاصل از ضربات برخورد دانه با صفحه و یا مقدار جابجایی صفحه بارگذاری شده را اندازه می‌گیرد؛ به دست می‌آید. نیرو به وسیله بارسنج<sup>۱</sup> که نیرو را به جریان الکتریکی تبدیل می‌کند؛ اندازه گیری می‌شود. کوچک‌ترین تغییر شکل در بارسنج باعث تغییر در ولتاژ خروجی آن می‌شود که این تغییرات ولتاژ، از طریق یک ریزپردازنده که به رایانه متصل می‌گردد میزان عملکرد لحظه‌ای (شدت جریان جرمی) محصول را نمایش می‌دهد.

در سال ۱۹۹۱ نقشه‌هایی از عملکرد محصول برداشت شده با کمباین، به کمک تجهیزات آشکارسازی عملکرد لحظه‌ای و سامانه مکان یابی جهانی تعیین گردید (Vansichen and De Baerdemaeker, 1991). آنها عملکرد محصول را با یک جریان سنج جرمی نوع ضربه‌ای تعیین کردند. این حسگر براساس تغییر مومنتوم در زمان تغییر مسیر مواد در حال جریان عمل می‌کرد. خطای این حسگر بین ۲/۴٪ تا ۳/۵٪ بود.

در سال ۱۹۹۶ عملکرد حسگر جریان دانه از نوع حجمی با نام تجاری (Claydon- Yield O Meter) و حسگر نوع ضربه‌ای (Ag-Leader Yield Monitor 2000) مقایسه گردید و خطای این دو نوع حسگر ۵٪± به دست آمد (Birrell et al., 1996).

در سال ۱۹۹۷ با بررسی حسگر جریان جرمی مدل مسی فرگوسن از نوع اشعه گاما، درصد خطای این نوع حسگر به هنگام اندازه گیری لحظه‌ای جریان دانه ۶٪± و به هنگام اندازه گیری وزن تجمعی ۵٪± به دست آمد (Moore, 1997). در سال ۱۹۹۸ تجهیزات آزمایشگاهی مخصوص مقایسه دقت آشکارساز عملکرد محصول غلات با یک باسکول الکترونیکی توسعه داده شد (Arslan and Colvin, 1998). آنان با اجرای آزمون‌های آزمایشگاهی، همبستگی بالایی را بین داده‌های آشکارساز عملکرد لحظه‌ای و باسکول الکترونیکی به دست آوردند (Arslan and Colvin, 1999).

در سال ۲۰۰۳ با انجام تغییراتی در بالای دانه تمیز، گشتاور مورد نیاز آن اندازه گیری گردید (Chaplin et al. 2003). حسگر گشتاور نسبت به حسگر جریان جرمی به تغییرات جریان دانه در بالای دانه تمیز حساسیت بیشتری داشت. هیچ یک از دو روش اندازه‌گیری قادر نبود شدت جریان جرمی زیر  $3 \text{ kg s}^{-1}$  را با دقت خوبی اندازه گیری کند. خطاهای استاندارد هر دو روش به طور معنی داری با کم شدن شدت جریان جرمی افزایش یافت (از ۵٪ تا ۱۸٪ برای حسگر گشتاور و ۱۵٪ تا ۶۰٪ برای حسگر ضربه‌ای).

در سال ۲۰۰۴ یک دستگاه شبیه ساز متحرک آشکارسازی عملکرد محصول طرح و توسعه داده شد (Loghavi, et al., 2004).

یک بازوی آلومینیومی استفاده شد (شکل ۲). در ساخت این حسگر با در نظر گرفتن حداکثر مقداری نیروی ضربه‌ای وارد از طرف جریان محصول به صفحه انحناء دار و طول بازوی متصل به صفحه انحناء دار (پروفیل آلومینیومی) از بارسنج نوع تیر طره با مشخصات حداکثر ظرفیت بار ۱۰ kgf مدل Bongshin ساخت کشور کره استفاده شد. صفحه نمایشگر یک سیستم توزین الکترونیکی است که خروجی بارسنج را که به صورت ولتاژ می‌باشد، به وزن تبدیل می‌کند. در این تحقیق از یک سیستم توزین الکترونیکی مدل Digital indicator - 7220 استفاده شد که از مزایای آن قابلیت اتصال به رایانه از طریق USB یا پورت RS232 بود.

بُرد الکترونیکی ساخته شده جهت دستگاه Test stand مداری است شامل دو عدد میکروکنترلر و دو عدد IC که اطلاعات را از دو سیستم توزین TEC (مخزن) و Digital indicator 7220 (سنسور جریان جرمی) گرفته و از طریق پورت USB به رایانه منتقل می‌کند. برای ثبت داده‌های این دو سیستم در رایانه نرم افزاری با استفاده از برنامه Visual C++ و با توجه به مشخصات این دو سیستم طراحی شد.

#### کالیبراسیون (واسنجی) حسگر ضربه‌ای:

به منظور واسنجی حسگر ضربه‌ای، از وزنه‌های استاندارد ۰/۵ تا ۴/۵ کیلوگرمی با گام‌های ۰/۵ کیلوگرمی استفاده شد و با توجه به مکانیزم و موقعیت قرارگیری حسگر، مطابق شکل ۳ بارگذاری و واسنجی گردید و نمودار خطی برازش بین وزنه‌های استاندارد و خروجی حسگر با ضریب همبستگی ۰/۹۹ به دست آمد (شکل ۴).

#### مراحل آزمایش (داده برداری):

مراحل آزمون و داده برداری بر اساس استاندارد ASABE S578 JAN2007 اجرا گردید. این استاندارد شامل دستورالعمل‌هایی به منظور یکنواخت سازی اجرای آزمون‌های آزمایشگاهی سنجش دقت و گزارش عملکرد حسگرهای پایش عملکرد غلات و محصولات برداشت شده به صورت فله‌ای می‌باشد. بر این اساس قبل از انجام هر گونه آزمایش، سیستم توزین (TEC) مخزن (مرجع) و Digital Indicator حسگر جریان جرمی ساخته شده با توجه به دستورالعمل شرکت سازنده و با استفاده از وزنه‌های استاندارد کالیبره شد. سپس ماکزیمم جریان جرمی قابل انتقال توسط مجموعه هلیس و بالابر دانه (گندم رقم روشن) برابر با ۴/۲۵ کیلوگرم در ثانیه تعیین گردید. آزمایش‌ها با توجه به استاندارد فوق‌الذکر در دو مرحله انجام شد:

انحصار چند کشور اروپایی و آمریکایی بوده و نمونه‌های تجاری و یا فناوری ساخت آنها در اختیار کشورهای در حال توسعه و خصوصاً ایران قرار داده نمی‌شود، طراحی و ساخت و ارزیابی حسگر جریان جرمی در کمابین برداشت گندم از اهداف کلی این پژوهش بوده و اهداف اختصاصی آن عبارتند از:

طراحی و ساخت حسگر جریان جرمی از نوع صفحه ضربه‌ای با استفاده از ابزار و فناوری بومی و قابل دسترس در ایران. ارزیابی دقت و صحت آشکارساز طراحی شده در سطوح مختلف جریان جرمی و انواع جریان یکنواخت و متغیر.

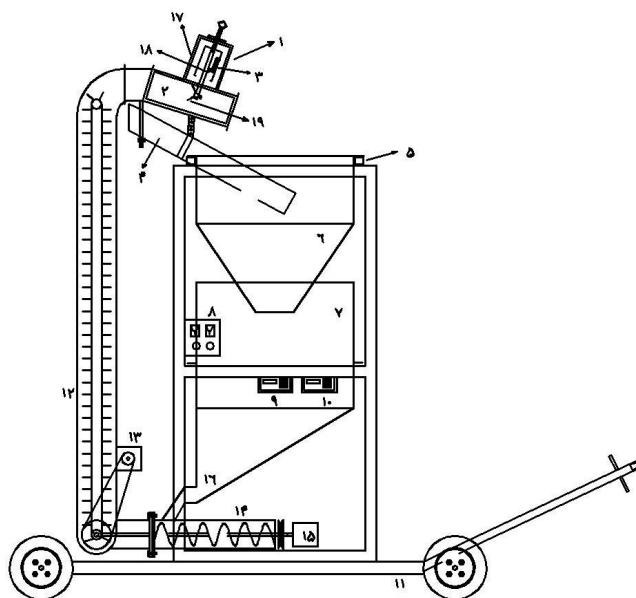
قابل اعتمادترین روش تعیین دقت سنجش جریان جرمی از طریق مقایسه داده‌های حسگر آنی عملکرد محصول با داده‌های سیستم توزین مستقل محصول در یک مسیر جریان مشترک می‌باشد (Al-Mahasneh and Colvin, 2000). لذا در این تحقیق ارزیابی دقت و صحت حسگر با استفاده از تجهیزات آزمون آزمایشگاهی حسگرهای جریان جرمی که با استفاده از روش مقایسه داده‌های حسگر با سامانه توزین مرجع قبلاً در دانشگاه شیراز طراحی و ساخته شده است (Loghavi and Almaee, 2009)، انجام گردید.

#### مواد و روش‌ها

پس از بررسی و مقایسه انواع روش‌های ساخت حسگر جریان جرمی، حسگر ضربه‌ای از نوع مجهز به بارسنج طراحی، ساخت و در قسمت دهانه خروجی بالابر دانه نصب شد. شکل شماره ۱، طرحی شماتیک از حسگر جریان جرمی ساخته شده و موقعیت قرارگیری آن روی تجهیزات آزمایشگاهی آزمون آشکارسازهای عملکرد کمابین غلات را نشان می‌دهد. اجزاء این حسگر عبارت از: قاب افقی (کانال افقی)، قاب عمودی، قاب نگهدارنده بارسنج، بازوی انتقال نیرو، صفحه انحناء دار، بارسنج، صفحه نمایشگر و بُرد الکترونیکی می‌باشد.

قاب افقی که مجهز به دیواره‌هایی از جنس پلاستیک شفاف می‌باشد، علاوه بر هدایت غله به مخزن، به عنوان سکوی نگهدارنده قاب عمودی و کلیه اجزای حسگر جریان جرمی مورد استفاده می‌باشد. دیواره‌های قاب عمودی که جهت نگهداشتن قاب نگهدارنده بارسنج به کار می‌رود، به منظور مشاهده اجزاء حسگر از جنس پلاستیک شفاف انتخاب شد. ابعاد قاب نگهدارنده بارسنج براساس ابعاد بارسنج و بازوی انتقال نیرو و همچنین براساس امکان قابلیت جابجایی قاب عمودی جهت تنظیم موقعیت افقی، عمودی و زاویه‌ای، طراحی و ساخته شد.

به منظور سنجش جریان جرمی مواد خروجی از بالابر، صفحه انحناء‌دار از جنس فولاد ضد زنگ ساخته شد و برای انتقال نیروهای ضربه‌ای ناشی از برخورد محصول به صفحه انحناء‌دار به بارسنج از

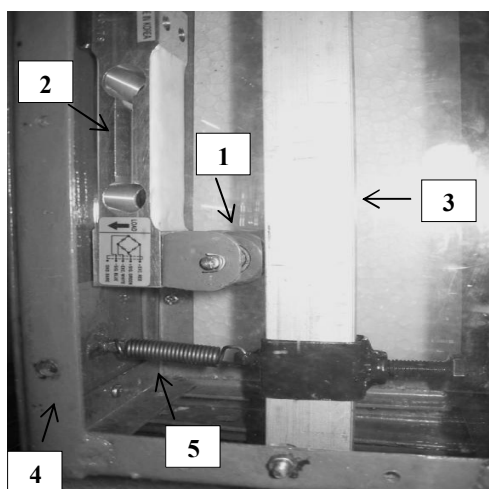


شکل ۱- طرح شماتیک حسگر جریان جرمی نصب شده روی شبیه ساز متحرک آشکارساز عملکرد غلات

اجزاء شکل عبارتند از: ۱- حسگر جریان جرمی ۲- قاب افقی ۳- بارسنج حسگر جریان جرمی ۴- ناودانی ۵- بارسنج مخزن اندازه گیری ۶- مخزن اندازه گیری (مرجع) ۷- مخزن ذخیره ۸- تابلو برق ۹- آشکارساز حسگر جریان جرمی ۱۰- آشکارساز مخزن اندازه گیری ۱۱- ارابه ۱۲- بالابر دانه ۱۳- موتور بالابر ۱۴- هلیس منتقل کننده دانه ۱۵- موتور هلیس ۱۶- دریچه تنظیم جریان جرمی ۱۷- قاب عمودی ۱۸- بلبرینگ ۱۹- صفحه انحناء دار

Fig.1. Schematic design of mass flow sensor mounted on the mobile yield monitoring simulator

The picture components include: 1. Mass flow sensor, 2. Horizontal frame, 3. Mass flow sensor load cell, 4. Chute, 5. Reference bin load cell, 6. Reference bin, 7. Supply bin, 8. Electric board, 9. Mass flow sensor monitor, 10. Reference bin monitor, 11. Carriage, 12. Grain elevator, 13. Elevator motor, 14. Grain auger, 15. Auger motor, 16. Mass flow control gate, 17. Vertical frame, 18. Ball bearing, 19. Curved plate

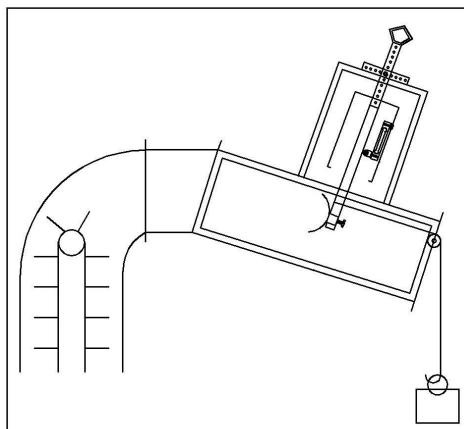


شکل ۲- بارسنج و نحوه نصب و بارگذاری:

۱- بلبرینگ ۲- بارسنج ۳- پروفیل آلومینیومی (بازو) ۴- قاب نگهدارنده بارسنج ۵- فنر نگهدارنده بازو به بلبرینگ

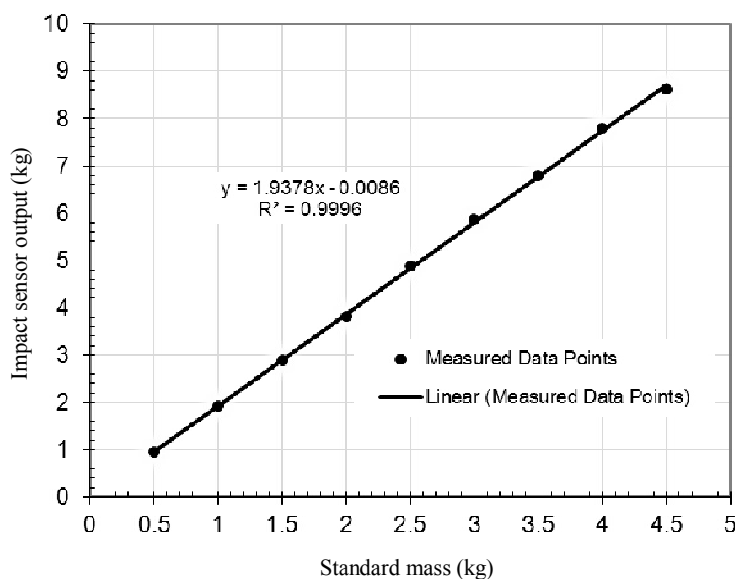
Fig.2. Load cell installation and loading arrangement.

1. Ball bearing, 2. Load cell, 3. Aluminum bar, 4. Load cell frame, 5. Arm retaining spring



شکل ۳- تصویر شماتیک نحوه بارگذاری و واسنجی حسگر ضربه‌ای جریان جرمی

Fig.3. Schematic diagram showing impact mass flow sensor loading and calibration



شکل ۴- نمودار واسنجی حسگر ضربه‌ای جریان جرمی

Fig.4. Calibration curve of the impact mass flow sensor

جرمی به مدت ۱۸ ثانیه (هر ۱۰۰ میلی ثانیه یک داده) ثبت گردید (شکل ۵).

#### آزمایش در حالت جریان جرمی غیر یکنواخت

در شرایط جریان جرمی غیر یکنواخت دو نوع آزمایش اجرا گردید:

الف - آزمایش جریان جرمی با تغییر خطی "افزاینده-کاهنده" و "کاهنده-افزاینده"

در مرحله "افزاینده-کاهنده"، آزمایش شامل افزایش و کاهش

#### آزمایش در جریان جرمی یکنواخت و ثابت<sup>۱</sup>

با مشخص بودن ماکزیمم جریان جرمی قابل انتقال توسط هلیس و بالای ۴/۲۵ کیلوگرم در ثانیه، چهار میزان جریان جرمی ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ ماکزیمم نرخ جریان جرمی (بر طبق استاندارد فوق الذکر)، هر کدام در سه تکرار آزمایش شد. پس از اینکه جریان جرمی در هر کدام از چهار میزان، حالت ثابت به خود گرفت؛ داده‌های سیستم توزین TEC مخزن و Digital Indicator حسگر جریان

1- Steady state

## نتایج و بحث

### الف- نتایج حاصل از آزمایش در حالت جریان جرمی یکنواخت و ثابت

با توجه به برنامه نویسی انجام شده جهت ثبت داده‌های توزین مخزن مرجع و حسگر ضربه‌ای، در هر ۰/۱ ثانیه یک داده ثبت گردید. پس از استخراج داده‌ها، نمودار خطی تغییرات داده‌های جریان جرمی ثبت شده توسط حسگر در سطوح (درصد‌های) مختلف حداکثر ظرفیت سیستم انتقال مواد مطابق شکل ۷ ترسیم گردید. نزدیکی مقادیر برآورد شده توسط حسگر با مقادیر متناظر جریان جرمی واقعی (ثبت شده توسط بارسنج‌های مخزن مرجع) در سطوح مختلف ظرفیت و ضریب تبیین بالای به دست آمده ( $R^2 = 0/9941$ ) حاکی از دقت قابل قبول حسگر ضربه‌ای در اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی می‌باشد.

نمودارهای تغییرات لحظه‌ای حسگر ضربه‌ای و مخزن مرجع در چهار سطح ظرفیت مورد آزمایش در شکل ۸ ارائه گردیده است. همچنین به عنوان نمونه نمودار تجمعی مربوط به سطح ۷۵٪ ظرفیت سامانه در شکل ۹ ارائه گردیده است. اختلاف مشاهده شده در مقادیر تجمعی جرم غله سنجیده شده توسط حسگر جریان جرمی و سامانه توزین مخزن مرجع ناشی از تأخیر داده‌های حسگر جریان جرمی در لحظات اولیه شروع داده برداری در رسیدن به حالت پایدار می‌باشد. این تأخیر و افزایش تدریجی داده‌های لحظه‌ای تا رسیدن به حالت پایدار در نمودارهای شکل ۸ به ویژه در مورد نمودار ۷۵٪ ظرفیت مشاهده می‌گردد.

یکنواخت و خطی میزان جریان جرمی می‌باشد که مطابق نمودار شکل ۶a از ۵۰٪ نرخ جریان جرمی ماکزیمم آغاز شده و در مدت ۱۰ ثانیه به طور یکنواخت به نرخ جریان جرمی ماکزیمم رسانیده می‌شود. پس از ۱۰ ثانیه توقف در ماکزیمم نرخ جریان جرمی در نقطه میانی مجدداً در طول مدت ۱۰ ثانیه به طور یکنواخت به ۵۰٪ نرخ جریان جرمی ماکزیمم کاهش داده می‌شود.

در مرحله "کاهنده-افزاینده"، آزمایش با تغییر خطی از نرخ جریان جرمی ماکزیمم آغاز شده و پس از توقف در ۵۰٪ نرخ جریان جرمی مجدداً مطابق نمودار شکل ۶b به طور یکنواخت به نقطه ماکزیمم نرخ جریان جرمی افزایش داده می‌شود.

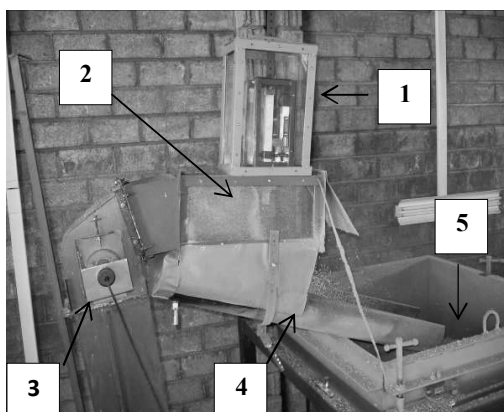
### ب- آزمایش جریان جرمی نوسانی

این آزمایش از ۵۰٪ نرخ جریان جرمی ماکزیمم شروع می‌شود و مطابق شکل ۶c در فواصل زمانی ۱۰ ثانیه به صورت خطی بین مقادیر ۵۰٪ و ۱۰۰٪ نرخ جریان جرمی ماکزیمم نوسان می‌نماید. آزمایش با سه مرتبه تکرار انجام می‌شود.

### محاسبه درصد خطای حسگر ضربه‌ای

با توجه به دقت بالای بارسنج‌های مخزن مرجع (۰/۰۱ کیلوگرم) و واسنجی مداوم آنها برای اطمینان از صحت سنجش وزن مواد وارد به آن، هرگونه اختلاف نسبی داده‌های حسگر ضربه‌ای با داده‌های متناظر مخزن مرجع به عنوان خطای حسگر ضربه‌ای محسوب و از رابطه (۱)، به منظور محاسبه درصد خطا استفاده شد.

$$(1) \quad \text{درصد خطا} = \left( \frac{\text{دبی مخزن} / \text{دبی حسگر ضربه‌ای}}{\text{دبی مخزن}} - 1 \right) \times 100$$

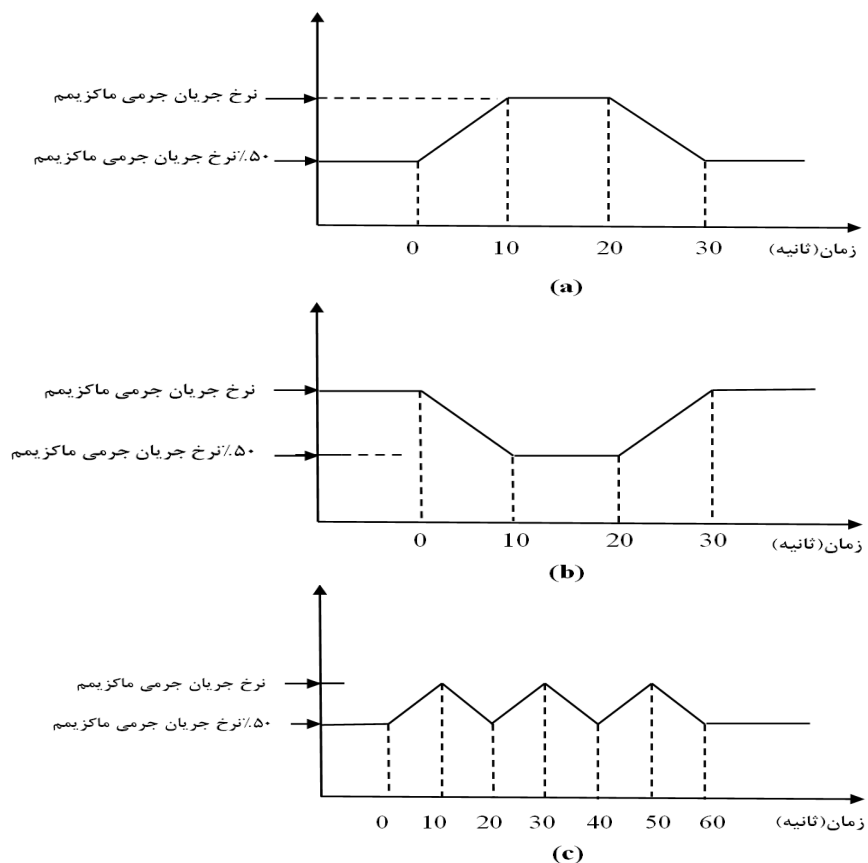


شکل ۵- تصویری از کارکرد حسگر ضربه‌ای، داده برداری و ثبت اطلاعات حسگر از طریق رایانه

اجزاء شکل سمت چپ عبارتند از: ۱- حسگر ضربه‌ای ۲- صفحه انحناء دار ۳- دورسنج محور ۴- ناودانی ۵- مخزن مرجع

Fig.5. The impact sensor, data acquisition and recording on a personal computer

Components include: 1. Mass flow sensor, 2. Curved plate, 3. Shaft encoder, 4. Chute, 5. Reference bin



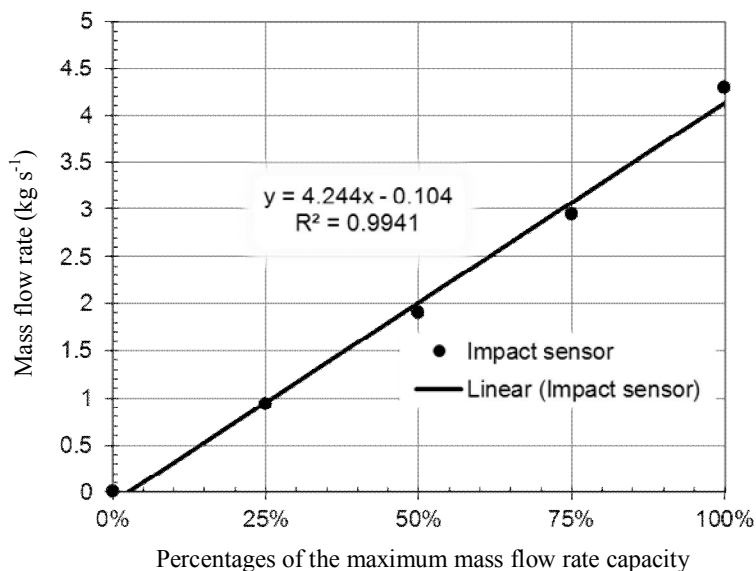
شکل ۶- مراحل اجرای آزمایش جریان جرمی غیریکنواخت بر طبق استاندارد ASABE S 578  
 (a) تغییرات خطی "افزاینده- کاهنده" (b) تغییرات خطی "کاهنده-افزاینده" (c) جریان جرمی نوسانی

Fig.6. Unsteady state mass flow rate test according to ASABE standard S 578

a)"Ramp up-ramp down" linear variations b)"Ramp down-ramp up" linear variations c) Fluctuating variations

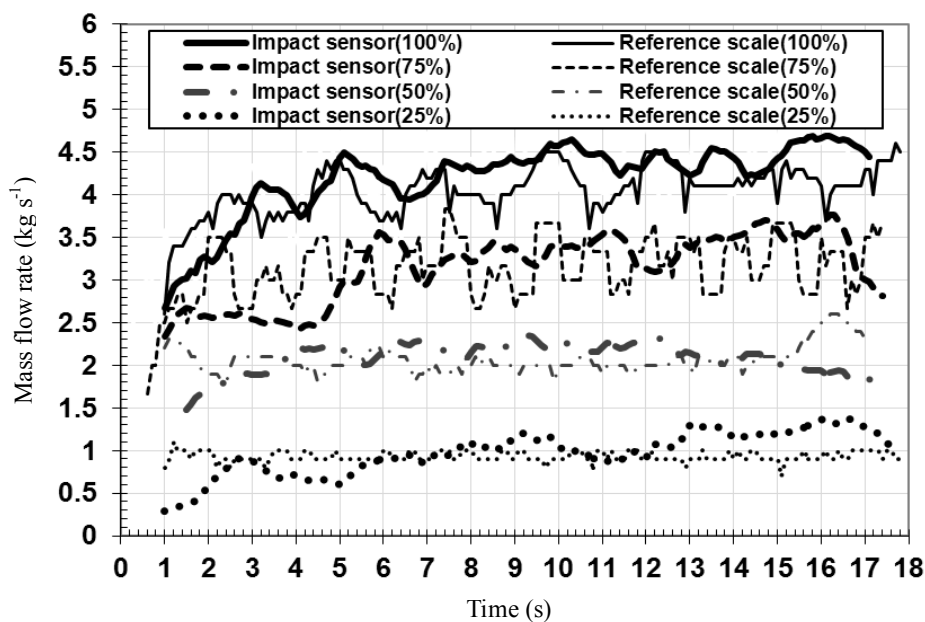
۷۵٪ و ۱۰۰٪ ظرفیت سیستم انتقال به ترتیب ۴۱۳ rpm، ۴۰۹ rpm، ۴۰۶ rpm و ۴۰۴ rpm ثبت گردید. با توجه به تغییرات اندک دور با افزایش بار روی بالابر می توان اثر تغییرات سرعت بر ممتهم مواد در برخورد با حسگر ضربه‌ای را ناچیز شمرد و تغییرات در خروجی حسگر را متناسب با تغییر در جرم مواد برخورد کننده دانست.

به منظور کسب اطمینان از این که تغییرات خروجی حسگر ضربه‌ای به طور عمده ناشی از تغییرات نرخ جریان جرمی مواد دانه‌ای برخورد کننده با آن بوده است و نه تغییرات احتمالی سرعت مواد، سرعت دورانی محور بالابر دانه توسط دورسنج نصب شده روی شافت بالابر اندازه گیری و مقدار آن در نرخ‌های جریان جرمی ۲۵٪، ۵۰٪،



شکل ۷- رابطه بین درصد‌های حداکثر ظرفیت نرخ جریان جرمی و نرخ جریان جرمی حسگر ضربه‌ای

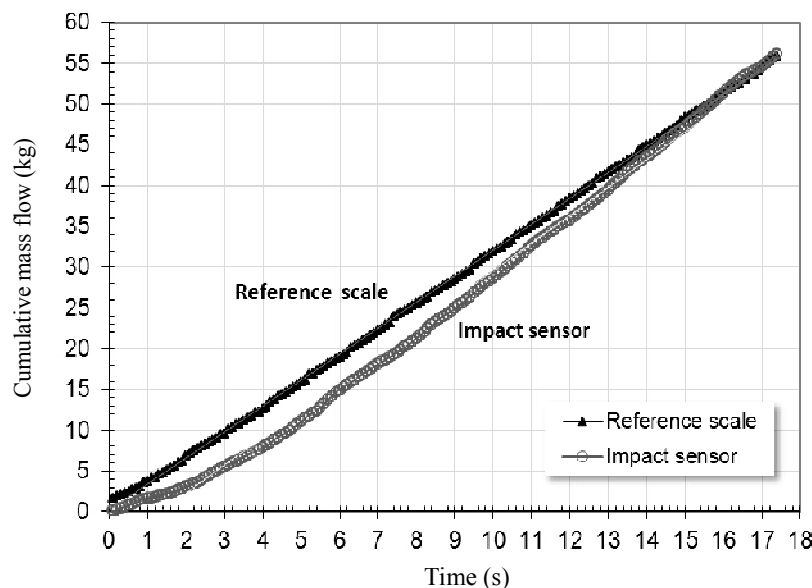
Fig.7. The relationship between percentages of the maximum mass flow rate capacity and mass flow rate detected by the impact plate sensor



شکل ۸- نمودارهای تغییرات لحظه‌ای جریان جرمی حسگر ضربه‌ای و مخزن مرجع در چهار سطح ظرفیت سامانه

Fig.8. Variation curves of instantaneous mass flow rates of impact plate sensor and reference bin at four levels of flow capacity





شکل ۹- منحنی تغییرات داده‌های جریان جرمی تجمعی حسگر ضربه‌ای و داده‌های تجمعی مخزن مرجع در ۷۵٪ ظرفیت  
 Fig.9. Variations of cumulative mass flow data of impact sensor and cumulative reference bin data at 75% flow capacity

نمودارهای داده‌های لحظه‌ای و تجمعی حسگر ضربه‌ای و مخزن مرجع در حالت نرخ جریان جرمی غیر یکنواخت با تغییرات خطی "افزاینده-کاهنده" در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ترسیم و مقایسه شده‌اند. در شکل ۱۰، نمودار تغییرات خطی جریان جرمی مورد هدف در این نوع آزمون به منظور مقایسه با تغییرات داده‌های این دو حسگر نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با وجود تأخیر چند ثانیه‌ای داده‌های حسگر جریان جرمی نسبت به جریان مورد هدف، در ابتدای شروع فرمان تغییر ناشی از خاصیت اینرسی مواد است و نوسان‌های شدیدتر داده‌های بارسنج مخزن مرجع که ناشی از ارتعاش حاصل از ریزش مواد در مخزن است، هر دو حسگر پاسخ نسبتاً یکسان و متناسبی را با فرمان صادره نشان داده‌اند. ضریب همبستگی بالای (۰/۹۹) رابطه بین داده‌های تجمعی حسگر ضربه‌ای و مخزن (مرجع) در نرخ جریان جرمی غیر یکنواخت با تغییرات خطی افزایشده-کاهنده که در شکل ۱۱، نشان داده شده است حاکی از دقت و حساسیت بالای حسگر ضربه‌ای در سنجش تغییرات جریان جرمی مواد می‌باشد.

در حالت نرخ جریان جرمی غیر یکنواخت با تغییرات خطی "کاهنده-افزاینده" که نمودارهای جریان جرمی لحظه‌ای و تجمعی آن به ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است، نتایج مشابهی را می‌توان استنتاج نمود؛ هرچند که در این مورد نوسانات شدیدتر و پراکندگی بیش‌تر داده‌های بارسنج مخزن مرجع منجر به ضریب همبستگی کوچک‌تر رابطه بین داده‌های تجمعی

با توجه به منحنی‌های به دست آمده از نرخ‌های جریان جرمی ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ ظرفیت سیستم انتقال و مقایسه آن‌ها این نتایج به دست آمد:

۱- با افزایش نرخ جریان جرمی و متناسب با آن، خروجی حسگر ضربه‌ای افزایش می‌یابد (شکل ۷). لذا می‌توان از این حسگر برای سنجش جریان جرمی در کمباین غلات استفاده نمود.

۲- با افزایش نرخ جریان جرمی، میزان درصد خطای حسگر ضربه‌ای کاهش یافت به طوری که درصد خطای محاسبه شده در نرخ‌های جریان جرمی ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ ظرفیت به ترتیب ۸/۳، ۶/۳، ۵/۲ و ۴/۹ درصد بود. این کاهش خطا را می‌توان به یکنواخت‌تر شدن جریان جرمی با افزایش نرخ جریان که از ویژگی‌های سیستم انتقال ماریپیچ و زنبه‌ای مورد استفاده در این تحقیق است؛ نسبت داد.

۳- با افزایش نرخ جریان جرمی، سرعت دوران شافت بالابر یا به عبارت دیگر سرعت خطی بالابر به میزان ناچیزی کاهش یافت. لذا تغییرات نیروی ضربه‌ای (ممتنم) وارد به حسگر را می‌توان عمدتاً ناشی از تغییرات نرخ جریان جرمی دانست.

۴- ضرایب همبستگی خطی بین داده‌های تجمعی حسگر ضربه‌ای و بارسنج‌های مخزن مرجع در نرخ‌های جریان جرمی ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ به ترتیب: ۰/۹۹۳، ۰/۹۸۹، ۰/۹۹۷ و ۰/۹۹۵ به دست آمد.

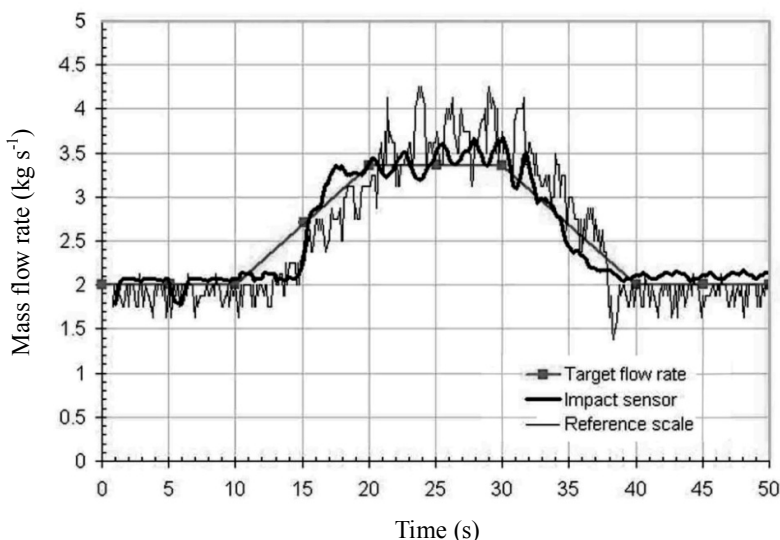
ب. نتایج حاصل از آزمایش در حالت جریان جرمی غیر یکنواخت یا گذرا

حسگر ضربه‌ای و مخزن (مرجع) گردیده است.

تغییرات نوسانی مورد هدف را تقلید نموده‌اند؛ هر چند که در این جا نیز، داده‌های بارسنج مخزن مرجع دارای نوسان‌های شدیدتری بوده است. علی‌رغم اختلاف‌های نسبتاً زیاد بین داده‌های لحظه‌ای دو حسگر (ضربه‌ای و بارسنج مخزن) در طول اجرای آزمون، شکل ۱۵ نشان می‌دهد که در پایان زمان داده برداری (ثانیه ۶۵)، جرم تجمعی ثبت شده توسط هر دو حسگر تقریباً یکسان و برابر با ۱۵۰ کیلوگرم بوده است.

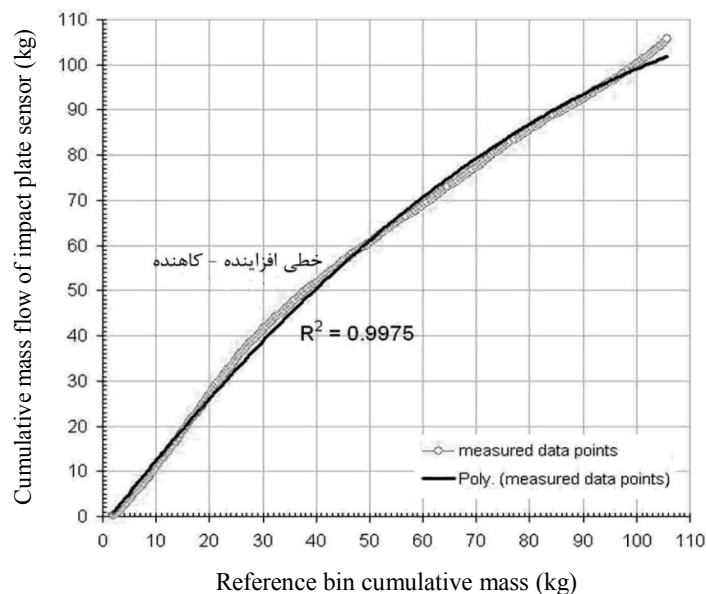
### ج- نتایج حاصل آزمایش درحالت جریان جرمی غیر یکنواخت نوسانی

نمودارهای داده‌های لحظه‌ای و تجمعی حسگر ضربه‌ای و مخزن مرجع درحالت نرخ جریان جرمی غیر یکنواخت نوسانی در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ ترسیم و مقایسه گردیده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که داده‌های حسگرهای ضربه‌ای و بارسنج‌های مخزن مرجع هر دو روندی مشابه



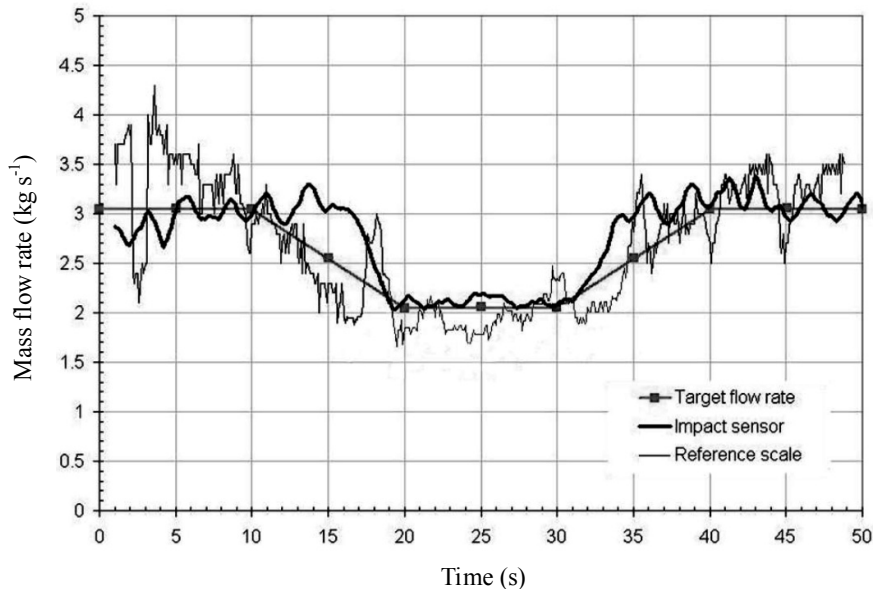
شکل ۱۰- مقایسه نرخ جریان جرمی لحظه‌ای حسگر ضربه‌ای و بارسنج مخزن مرجع در جریان جرمی غیر یکنواخت با تغییرات خطی افزایشی-کاهنده

Fig.10. The comparison between instantaneous data of impact plate sensor and reference bin at linear "ramp up-ramp down" variations



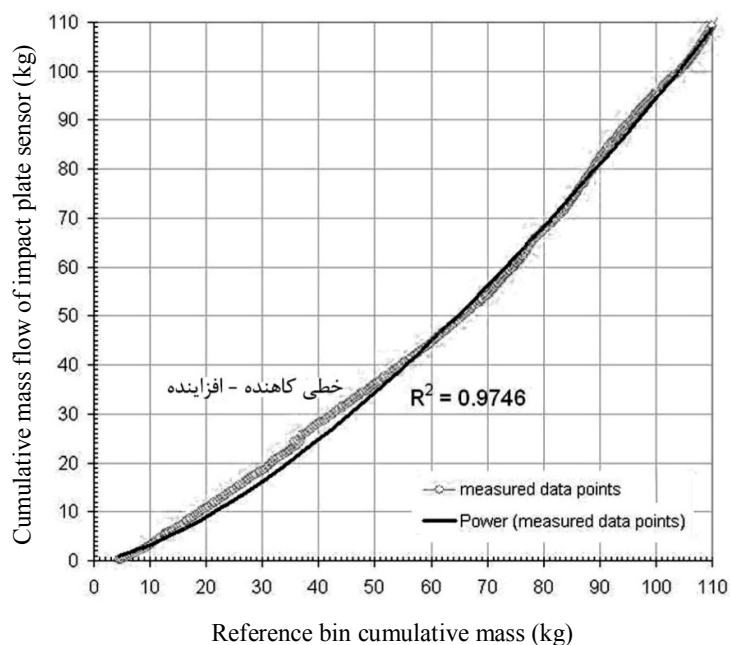
شکل ۱۱- رابطه بین داده‌های تجمعی حسگر ضربه‌ای و بارسنج مخزن مرجع در نرخ جریان جرمی غیر یکنواخت با تغییرات خطی افزایشده-کاهشده

Fig.11. The relation between cumulative data of impact plate sensor and reference bin at linear "ramp up-ramp down" variations



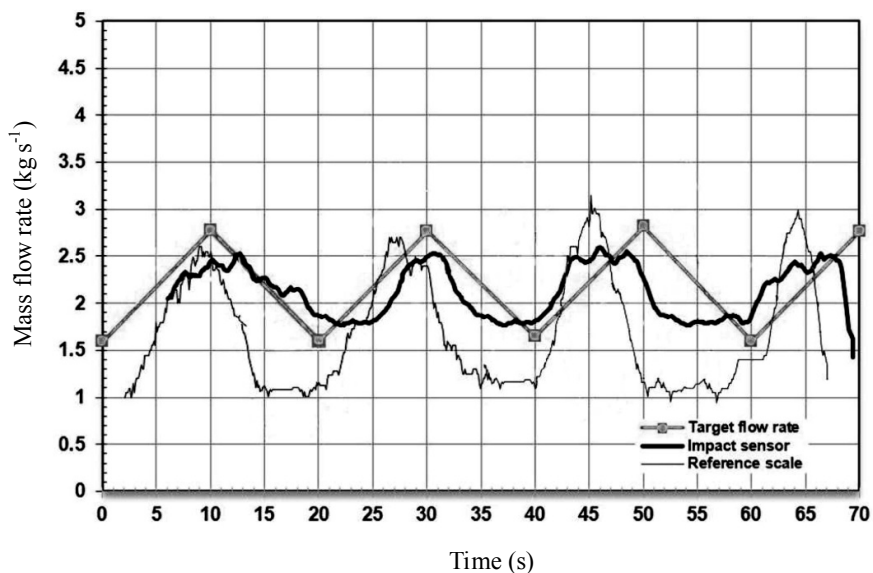
شکل ۱۲- مقایسه داده‌های نرخ جریان جرمی لحظه‌ای حسگر ضربه‌ای و بارسنج مخزن مرجع درحالت نرخ جریان جرمی غیر یکنواخت با تغییرات خطی کاهشده-افزایشده

Fig.12. Comparison of impact plate sensor and reference scale load cell data at linear "ramp down-ramp up" variations of mass flow rate



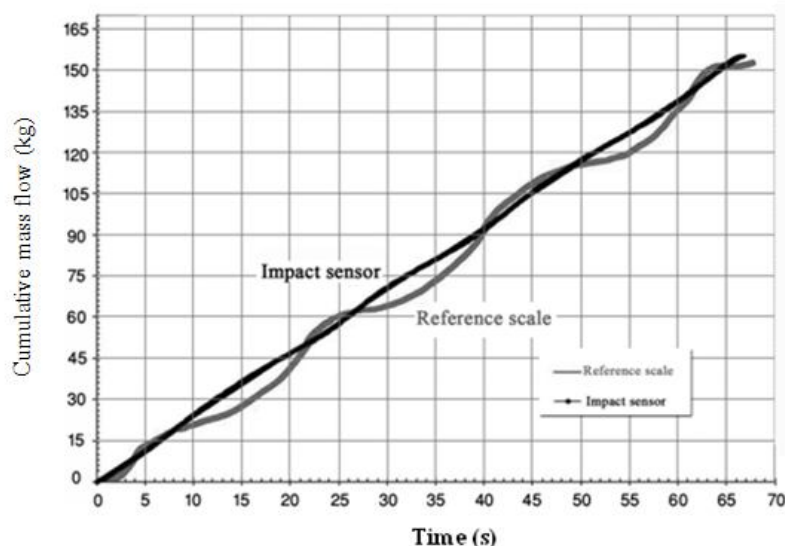
شکل ۱۳- رابطه بین داده‌های تجمعی حسگر ضربه‌ای و بارسنج مخزن مرجع در نرخ جریان جرمی غیر یکنواخت با تغییرات خطی کاهنده-افزاینده

Fig.13. The relation between cumulative data of impact plate sensor and reference bin at linear "ramp down-ramp up" variations of mass flow rate



شکل ۱۴- مقایسه نرخ جریان جرمی لحظه‌ای حسگر ضربه‌ای و بارسنج مخزن مرجع در جریان جرمی نوسانی

Fig.14. Comparison of impact plate sensor and reference scale load cell mass flow rate data at fluctuating flow



شکل ۱۵- نمودارهای تغییرات داده‌های جریان جرمی تجمعی حسگر ضربه‌ای و بارسنج مخزن مرجع در جریان جرمی نوسانی  
**Fig.15.** Variation diagrams of impact plate sensor and reference bin load cell cumulative mass flow rate data at fluctuating flow

جریان جرمی غیر یکنواخت با تغییرات خطی "افزاینده - کاهنده"، "کاهنده-افزاینده" و نوسانی به ترتیب ۷/۴٪، ۸/۶٪، ۸/۳٪ تعیین گردید.

۳- علی‌رغم نوسان‌ها، اختلاف‌ها و تأخیر و تقدم‌های مشاهده شده در داده‌های لحظه‌ای حسگر ضربه‌ای بالابر دانه و بارسنج‌های مخزن مرجع در آزمون‌های جریان جرمی غیر یکنواخت، جرم تجمعی ثبت شده توسط هر دو حسگر بسیار به هم نزدیک بود، به طوری که در مورد تغییرات خطی جریان جرمی دو نمودار حسگر و مخزن مرجع بر هم منطبق ( $R^2=0/99$ ) و در مورد نوسانی در پایان زمان آزمون هر دو سیستم جرم گندم عبوری را تقریباً یکسان (۱۵۰ کیلوگرم) نشان دادند.

سرعت دوران ثبت شده توسط دورسنج نصب شده روی شافت بالابر در جریان جرمی غیر یکنواخت با تغییرات خطی "افزاینده - کاهنده" ۴۰۸ تا ۴۱۲ دور بر دقیقه، با تغییرات خطی "کاهنده-افزاینده" ۴۰۹ تا ۴۱۲ دور بر دقیقه و در جریان جرمی غیر یکنواخت نوسانی ۴۱۱ تا ۴۱۲ دور بر دقیقه بود.

نتایج کلی حاصل از آزمایش‌های جریان جرمی غیر یکنواخت خطی افزایشی، خطی کاهنده و نوسانی عبارتند از:

۱- تغییرات ناچیز سرعت دورانی محور بالابر در این سه نرخ جریان جرمی، حاکی از پایداری موتور محرک بالابر در برابر تغییرات بار بوده، لذا تغییرات نیروی وارد بر حسگر ضربه‌ای را می‌توان تنها متأثر از تغییر نرخ جریان جرمی دانست.

۲- خطای متوسط حسگر ضربه‌ای در سنجش لحظه‌ای نرخ‌های

## منابع

1. Al-Mahasneh, M. A., and T. S. Colvin. 2000. Verification of yield monitors performance for on-the-go measurement of yield with an in-board electronic scale. *Trans. of the ASAE* 34(4): 801-807.
2. Arsalan, S., and T. S. Colvin. 1998. Laboratory test stand for combine grain yield monitors. *Applied Engineering in Agriculture* 14(4): 369-371.
3. Arsalan, S., and T. S. Colvin. 1999. Laboratory performance of a yield monitor. *Applied Engineering in Agriculture* 15(3): 189-195.
4. Arslan, S., F. Inanc, J. M. Gary, and T. S. Colvin. 2000. Grain flow measurements with x-ray techniques. *Computers and Electronics in Agriculture* 26: 65-80.
5. ASABE Standards. 2007. S578, Yield Monitor Performance Standard. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Mich.: ASAE.
6. Birrell, S. J., K. A. Sudduth, and S. C. Borgelt. 1996. Comparison of sensors and techniques for crop

- yield mapping. *Computers and Electronics in Agriculture* 14(2, 3): 215-223.
7. Borgelt, S. C. 1993. Sensing and measuring technologies for site-specific management. In: *Soil Specific Crop Management*, Ed. P. C. Robert et al. (ASA, CSSA & SSSA, Madison, WI): 141-157.
  8. Chaplin J., N. Hemming, and B. Hetchler. 2003. Comparison of an impact plate and torque based yield sensors. Paper No. 031034. 2003 ASAE Annual International Meeting, Las Vegas, Nevada 27-30 July 2003.
  9. Hummel, J. W., D. W. Pfeiffer and N. R. Miller. 1995. Sensing grain volumes on individual elevator flights. In: *Site-Specific Management for Agricultural Systems*, Ed. P. C. Roberts et al. (ASA, CSSA & SSSA, Madison, WI): 69-86.
  10. Klemme, K. A., J. A. Schumacher, and D. P. Donell. 1992. Results and advantages of a spacially variable technology for crop yield. ASAE Paper No. 92-1651.
  11. Lida, M., Y. Yao, A. Kimura, and M. Umeda. 2005. Development of grain yield monitor for head-feeding combines. An ASAE Section Meeting Presentation Paper, Number: 051136.
  12. Loghavi, M., and M. Almaee. 2009. Development of a laboratory test stand for grain combine yield monitoring. *Agricultural Engineering International: The CIGR EJournal*, Manuscript No. 1170.
  13. Loghavi, M., and R. Ehsani. 2004. Performance of a grain yield monitor: varying flow rate and ground slope using test stand. ASAE Paper No.041103, St. Joseph, MI, ASAE.
  14. Loghavi, M., R. Ehsani, and R. Reeder. 2007. Development of a portable grain mass flow sensor test rig. *Computers and Electronics in Agriculture* 61(2): 168-180.
  15. Massey Ferguson. 1993. Yield Mapping System. Manufacturer's Catalog. MF 30/40 Series Combines.
  16. Moore, M. 1997. An investigation into the accuracy of yield maps and their subsequent use in crop management, Ph.D. dissertation, Cranfield University, UK.
  17. Morgan, M. and D. Ess. 1997. *The Precision-Farming Guide for Agriculturists*. 1<sup>st</sup> Edition, Translated by M. Loghavi, Agricultural Research and Education Organization, Tehran, 295p. (In Farsi).
  18. Mostofi Sarkari, M. R., R. G. Godwin, M. J. O'Dogherty, and S. Minaei. 2007. Investigation on performance of a continuous mass flow rate measurement system for potato harvesting agricultural engineering international: the CIGR E-Journal. Manuscript PM 06 031. Vol. IX. May 2007.
  19. Mostofi Sarkari, M. R., and S. Minaei. 2009. Mass flow rate measurement system performance. *Agricultural Science and Technology (JAST)* 11: 259-274.
  20. Mostofi Sarkari, M. R., and S. Minaei. 2010. Performance evaluation of mass flow rate measurement system for root crop harvesting to precision farming application. *Agricultural Sciences and Sustainable production* 20(2): 142-151. (In Farsi).
  21. Nazarzadeh, S., M. R. Mostofi, and H. Mirzaee Moghadam. 2010. Design and fabrication of a continuous mass flow measurement device wheat grain harvested by Claas combine. 5<sup>th</sup> Agricultural Machinery and Mechanization Engineering Conference, Mashhad, Iran.
  22. Searcy, S. W., J. K. Schueller, Y. H. Base, S. C. Borgelt, and B. A. Stout. 1989. Mapping of spatially variable yield during grain combining. *Trans. of the ASAE* 32(3): 826-829.
  23. Schueller, J. K., Y. H. Bae, S. C. Borgelt, S. W. Searcy, and B. A. Stout. 1987. Determination of spatially variable yield maps. ASAE paper No. 87-1533. St. Joseph, MI, ASAE.
  24. Schnug, E., D. M. Murphy, E. Evans, S. Haneklaus, and J. Lamp. 1993. Yield mapping and application of yield maps to computer-aided local resource management. In: P. C. Robert, R. H. Rust and W. E. Larson, Ed., *Proceedings of Soil Specific Crop Management* 87-93.
  25. Stafford, J. V., B. Ambler, and M. P. Smith. 1991. Sensing and mapping grain yield variation. In: *Automated Agriculture for the 21<sup>st</sup> Century*. ASAE Publication No. 91-1191.
  26. Vansichen, R., and J. De Baerdemaeker. 1991. Continuous wheat yield measurement on a combine. *Transactions of the ASAE* 11:346-355.
  27. Wagner L. E., and M. D. Schrock. 1989. Yield determination using a pivoted auger flow sensor. *Transactions of the ASAE* 32(2): 409-413.