J. Agric. Mech., 10 (4):1-13 (2026)

Journal of
Agricultural Mechanization

Online ISSN: 2717-4107
Journal homepage: https://jam.tabrizu.ac.ir/?lang=en

Original Article

Starting the Header, Threshing and Discharge the Combine Harvester by Pneumatic Jack

Esmaeil Yremtaghlu[1], Mojtaba Jaberi Moeaz[2*]

1,2- Department of Biosystem, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

ARTICLE INFO

***Keywords*:**
Air cylinder,
Combine harvester,
Drive system,
Energy saving,
Pneumatic actuator

Received:
September 20, 2025

Revised:
December 23, 2025

Accepted:
December 24, 2025

*** Corresponding author:**
m.jaberimoeaz@basu.ac.ir

ABSTRACT

Introduction

Agricultural mechanization has become a crucial component in addressing the increasing global demand for food production while minimizing production costs and environmental impacts. Among agricultural machinery, combine harvesters play a vital role by integrating multiple harvesting processes such as cutting, threshing, separating, and unloading into a single operation. However, most conventional combine harvesters rely on hydraulic and mechanical actuation systems for controlling their primary functional units, including the header, threshing, and unloading mechanisms. Although these systems are well established, they are often characterized by relatively high energy consumption, complicated maintenance requirements, the risks of hydraulic oil leakage, and performance degradation under prolonged field use.

In recent years, pneumatic actuation systems have gained attention in various agricultural and industrial applications due to their advantages, including simpler design, lower weight, faster response time, no risk of oil leakage, and reduced operational costs. Studies such as those by Johnson (2023) and Gryboś (2024) have reported significant energy-saving potentials for pneumatic systems compared to conventional drives in different industrial settings. However, the use of pneumatic systems in combine harvesters has been limited, and there is a lack of comprehensive research evaluating their performance under real field conditions, particularly regarding durability, energy efficiency, and operational reliability.

This study was conducted to design, develop, and evaluate a pneumatic actuator (air cylinder) system as a substitute for traditional hydraulic and mechanical systems in combine harvesters. The main objectives were:

To reduce energy consumption and operational time during harvesting.
To improve the reliability, uniformity, and responsiveness of the drive system.
To assess the durability and maintenance costs under real working conditions.
To evaluate the economic feasibility of implementing pneumatic actuation in grain harvesters.

Materials and Methods

The study was carried out on a New Iran model straw combine harvester manufactured by Sabz Abad Hegmataneh Company in Hamedan Province, Iran. The field experiments were conducted on the Ehsan wheat variety.

The research followed a multi-stage approach comprising conceptual design, 3D modeling, dynamic simulation, prototype development, and field testing. Initially, a complete 3D model of the pneumatic actuation system was developed in SolidWorks 2018. Dynamic simulations, including analyses of displacement, velocity, acceleration, and force analysis under varying loads, were performed using MSC ADAMS. The prototype was then integrated into the combine harvester to replace the conventional hydraulic and mechanical drives of three key units:

The header unit for height adjustment,The threshing unit for concave clearance control,The unloading system for operating the auger pipe and grain discharge.

How to cite:
Yremtaghlu,E. Jaberi Moeaz,M. (2026). *Starting the Header, Threshing and Discharge the Combine Harvester by Pneumatic Jack* Journal of Agricultural Mechanization, 10 (4):1-13. https://doi.org/10.22034/10.22034/jam.2025.69177.1342.

This is an open-access article under the CC BY NC license
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

The experimental design was a randomized complete block design (RCBD) with three replications and three treatments: pneumatic, hydraulic, and mechanical drive systems. Key performance indicators included:
Energy consumption (kWh) measured using flow and pressure sensors,Unloading time (s) recorded using a stopwatch,Threshing efficiency (%) and uniformity of power transmission measured under field conditions,Durability (h) tested under dusty and humid environments,An economic evaluation of initial and annual maintenance costs.
Statistical analyses were performed using IBM SPSS Statistics 26, employing independent t-tests and one-way ANOVA followed by Duncan's multiple range tests at a 5% significance level.

Results and Discussion

The experimental results revealed that the pneumatic system significantly outperformed the conventional hydraulic and mechanical systems across all major performance parameters.
1. Energy Consumption
The pneumatic system consumed only 12.3 ± 0.8 kWh, representing a 23% reduction compared to the hydraulic (15.9 ± 1.1 kWh) and mechanical systems (16.4 ± 1.1 kWh). Similar energy-saving benefits were reported by Boyko and Weber (2024) in industrial pneumatic drives, indicating that air-actuated systems inherently require less energy due to the absence of continuous fluid pumping losses typical in hydraulic circuits.
2. Unloading Time
The unloading time of the grain tank decreased significantly from 54.3 ± 2.0 s (hydraulic) and 55.1 ± 2.1 s (mechanical) to 39.2 ± 1.5 s for the pneumatic system—a 28% reduction. Faster unloading allows for reduced combine downtime and improved field capacity, which is crucial for large-scale grain production systems.
3. Threshing Efficiency and Power Transmission Uniformity
Threshing efficiency reached 91.0 ± 2.2% with the pneumatic system, compared to 84.5 ± 2.5% for the hydraulic and 82.3 ± 0.3% for the mechanical systems. The smoother motion of pneumatic actuators minimized vibrations and shocks, reducing grain breakage and ensuring more uniform power delivery to the threshing drum.
4. Durability and Reliability
Durability testing under harsh field conditions (dust, moisture, and variable loads) showed that the pneumatic system maintained stable performance for 1200 operational hours, while the hydraulic and mechanical systems deteriorated after 930 h and 850 h, respectively. Reduced wear and the absence of hydraulic oil contamination were key contributing factors to the extended lifespan.
5. Economic Evaluation
The initial cost of the pneumatic system was 17% lower than that of the hydraulic system, while annual maintenance costs were reduced by 35%. The absence of hydraulic fluids, filters, and frequent servicing requirements resulted in significant long-term cost savings, making the pneumatic system economically attractive for farmers.
6. Effect of Field Variables
ANOVA results indicated that grain moisture content, threshing drum speed, and combine forward speed significantly influenced grain losses ($p < 0.05$). However, under optimized operational settings, the pneumatic system consistently exhibited lower grain loss and better performance than conventional systems.
7. Simulation Insights
Dynamic simulations in ADAMS revealed that pneumatic actuators provided smoother acceleration profiles, reduced peak forces during start-up, and minimized mechanical shocks. These findings align with those of Dettu et al. (2023), who reported similar benefits in precision agricultural machinery using pneumatic controls.
Collectively, these results demonstrate that pneumatic systems not only improve operational efficiency but also enhance machine reliability, reduce environmental risks associated with oil leaks, and support the broader goal of sustainable agricultural mechanization.

Conclusion

This research confirms that integrating pneumatic actuators into combine harvesters can significantly enhance energy efficiency, operational speed, durability, and cost-effectiveness compared to conventional hydraulic and mechanical systems. Key findings include:
A 23% reduction in energy consumption,A 28% decrease in unloading time,Improved threshing efficiency (91%) with reduced grain losses,Extended operational life up to 1200 hours,A 17% lower initial cost and a 35% reduced maintenance expenses.
Given these advantages, pneumatic actuation represents a promising alternative for next-generation agricultural machinery aiming for sustainability, cost reduction, and improved productivity. Future studies should explore hybrid pneumatic-hydraulic systems and incorporate advanced control algorithms, such as fuzzy logic and machine learning, to further optimize system performance under diverse field conditions.

نشریه
مکانیزاسیون کشاورزی
شاپا الکترونیکی: 2717-4107
درگاه نشریه: https://jam.tabrizu.ac.ir

مقاله پژوهشی

راه‌اندازی واحدهای درو، کوبنده و تخلیه کمباین برداشت غلات توسط سیستم محرک جک بادی

اسماعیل یارمطاقلو[1]، مجتبی جابری معز[2*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۳

۱و۲- گروه مهندسی بیوسیستم - دانشکده کشاورزی - دانشگاه بوعلی سینا - همدان - ایران

* نویسنده مسئول: E-mail: m.jaberimoeaz@basu.ac.ir

چکیده

ماشین‌های مختلفی در بخش کشاورزی مورداستفاده قرار می‌گیرند تا علاوه بر تسهیل و کاهش مدت‌زمان اجرای عملیات، سبب افزایش تولید محصول، افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه تولید گردند. افزایش بهره‌وری در فرآیند برداشت غلات نیازمند بهبود در سیستم‌های مکانیزه ازجمله واحدهای درو، کوبنده و تخلیه کمباین است. در این پژوهش، طراحی و راه‌اندازی سیستم محرک جک بادی (پنوماتیکی) به‌عنوان جایگزین محرک‌های هیدرولیکی و مکانیکی مرسوم موردبررسی قرار گرفت. هدف اصلی تحقیق، کاهش مصرف انرژی، افزایش سرعت عملکرد و ارتقاء قابلیت اطمینان کمباین در شرایط مزرعه بود. روش تحقیق شامل طراحی مفهومی، مدل‌سازی سه‌بعدی با نرم‌افزار SolidWorks، شبیه‌سازی در محیط MSC ADAMS، تجزیه‌وتحلیل داده‌های آماری با نرم‌افزار IBM SPSS و درنهایت ساخت نمونه آزمایشی و آزمون میدانی در مزرعه گندم بود. این آزمایش بر روی کمباین‌های تولیدی شرکت سبز آباد هگمتانه (کمباین کاه کوب مدل نیوایران) واقع در استان همدان انجام شد. گندم مورداستفاده رقم احسان بود. داده‌ها با استفاده از حسگر فشار، دبی سنج و کرنومتر برداشت و سپس تحلیل شدند. نتایج نشان داد که استفاده از جک بادی باعث کاهش ۲۳٪ مصرف انرژی محرک‌ها در مقایسه با سیستم هیدرولیکی شد. همچنین، زمان تخلیه مخزن غلات از ۵۴ ثانیه به ۳۹ ثانیه (کاهش ۲۸٪) رسید. در واحد کوبنده، یکنواختی انتقال نیرو به میزان ۹۱٪ حفظ شد که نسبت به سیستم مکانیکی (۸۲٪) بهبود محسوسی داشت. آزمایش دوام نشان داد که طول عمر عملکردی جک بادی در شرایط گردوغبار و رطوبت تا ۱۲۰۰ ساعت کارکرد پایدار باقی ماند، درحالی‌که نمونه مکانیکی در ۸۵۰ ساعت دچار افت راندمان شد. بر اساس ارزیابی اقتصادی، هزینه اولیه سیستم بادی نسبت‌به هیدرولیک ۱۷٪ کمتر بوده و هزینه نگهداری سالانه آن حدود ۳۵٪ کاهش یلفت. درمجموع، نتیجه گرفته شد به‌کارگیری سیستم محرک جک بادی در واحدهای مختلف کمباین برداشت غلات، علاوه بر صرفه‌جویی انرژی و زمان، موجب افزایش عمر مفید دستگاه و کاهش هزینه‌های نگهداری می‌گردد.

کلمات کلیدی: پنوماتیک، جک بادی، سیستم محرک، کاهش مصرف انرژی، کمباین برداشت غلات

This is an open-access article under the CC BY NC license
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

۱- مقدمه

کشاورزی یکی از بخش‌های مهم تولید است که اهمیت آن با توجه به تقاضای رو به رشد جهانی غذا به دلیل افزایش جمعیت و سطح رفاه زندگی بیش‌ازپیش آشکارشده است. بر این اساس، حرکت در مسیر تولید پایدار مورد تأکید است (Kheiralipour, 2022a: Kheiralipour, 2023)؛ بنابراین اجرای عملیات کشاورزی باید به‌گونه‌ای باشد که ضمن افزایش عملکرد محصول، اثرات زیست‌محیطی کاهش یابند (Kheiralipour, 2021a). در این راستا، به‌کارگیری ماشین در بخش‌های مختلف کشاورزی به‌منظور برون‌رفت از شکل سنتی آن ضروری است تا علاوه بر تسهیل و کاهش مدت‌زمان اجرای عملیات، سبب کاهش هزینه تولید و افزایش محصول گردند (Kheiralipour, 2022b: Kheiralipour, 2021b).

کمباین‌ها از مهم‌ترین ماشین‌های کشاورزی محسوب می‌شوند؛ چراکه نقش مهمی در تولید غلات به دلیل تسهیل عملیات و کاهش هزینه برداشت محصول ایفا می‌کنند (Azad Bakht &Vahedi Torshizi., 2021). کمباین‌های خودرو تا قبل از اواخر دهه ۱۹۴۰ در سطح وسیعی در بازار موجود نبود؛ چراکه یافتن ترکیب صحیح و مناسب توان پیشرانه و انتقال توان مشکل بود (Shahpasand et al., 2009). امروزه کمباین خودرو طوری تکامل‌یافته است که یک ماشین تقریباً کامل به‌حساب می‌آید و می‌تواند برخی محصولات زراعی را با عملکرد بالا برداشت نماید. ماشین کمباین سبب تسهیل عملیات برداشت، صرفه‌جویی در زمان برداشت و کاهش هزینه برداشت می‌شود (BehrouziLar et al., 2006).

به‌کارگیری تکنولوژی حفاظتی در زراعت غلات و حبوبات همواره چالش پیش روی کارشناسان و کشاورزان بوده است. در مکانیزه کردن کشاورزی زمانی مکانیزاسیون معنی خواهد داشت که با انجام آن صرف و صلاح کشاورز و درآمد بیشتر او مدنظر قرارگرفته شده باشد. در حال حاضر مشکلات کشاورزان در مرحله برداشت، پیچیدگی دستگاه‌ها، ضایعات (هدر رفتن کاه و کلش بخصوص سوزاندن مزارع پس از برداشت) شکستگی دانه و ریزش دانه سالم گاهی بیش از ۲۰٪ محصول را دربر دارد. درنتیجه راندمان کمتر محصول در سطح کشور و درآمد کمتر کشاورزان حاصل می‌شود (Haji Agha Alizadeh & Sepehr., 2022).

در سال‌های اخیر، استفاده از سیستم‌های نوین محرک در کمباین‌های برداشت غلات، ازجمله روش‌های هیدرولیکی، مکانیکی و هوای فشرده (جک بادی) برای راه‌اندازی و کنترل اجزایی چون واحد درو (هد)، کوبنده (خرمن‌کوب) و سیستم تخلیه، موردتوجه قرارگرفته است. چنین سیستمی می‌تواند مزایایی همچون کاهش مصرف نیروی مکانیکی، بهبود زمان پاسخ و عملکرد قابل تنظیم‌تر را برای اپراتور فراهم آورد.

کمباین‌ها اساساً ماشین‌های چندمنظوره برداشت هستند که به‌طور پیوسته عملیات درو، تغذیه، کوبیدن، جدا کردن و تخلیه غلاف یا دانه را به‌صورت یکپارچه انجام می‌دهند (Hansen, 2022). واحد درو محصول را از سطح مزرعه جدا کرده و به نقاله تغذیه انتقال می‌دهد؛ سپس محصول به واحد کوبنده می‌رسد، جایی که جدا کردن دانه از خوشه صورت می‌گیرد (Amberg, 2025).

در اکثر کمباین‌ها، کوبنده و ضد کوبنده متداول به‌صورت استوانه‌ای یا گردنده (در کمباین‌های محوری یا دوار) طراحی‌شده‌اند؛ که در سیستم گردنده، محصول توسط تسمه‌های مارپیچی که روی کوبنده قرارگرفته‌اند، با گردش استوانه به داخل بخش کوبیده هدایت می‌شود. سپس دانه‌ها توسط ضد کوبنده جداشده و کلش کش، از پیچیدن ساقه‌ها در اطراف کوبنده جلوگیری می‌کند (Guo et al., 2025a).

۱-۱- مزایا و معایب سیستم‌های پنوماتیکی

مزایا: سرعت پاسخ بالا، سبکی، نبود نشتی روغن و قیمت پایین نگه‌داری (Johnson, 2023).

معایب: بازده پایین انرژی، نیاز به سیستم آماده‌سازی هوا (فیلتر و رطوبت‌گیر) و وابستگی به کمپرسور (Eisen & Timos., 2022).

۱-۲- واحد درو[1]

حرکات سبک مانند تنظیم زاویه یا قفل‌کردن محافظ‌ها با پنوماتیک قابل انجام است (Amberg, 2025). استفاده از کنترل تناسبی پنوماتیک در تحقیقاتی مانند پژوهش (Wang et al., 2025)، نتایج خوبی نشان داده است.

۱-۳- واحد کوبنده[2]

برای بارهای سنگین همچنان هیدرولیک برتری دارد؛ اما برای کارهای سبک مثل باز/بسته کردن پوشش‌ها یا تنظیمات جزئی کونکاو، پنوماتیک مناسب است (Guo et al., 2025b). به‌منظور نگه‌داری موقعیت بدون مصرف هوا، استفاده از مکانیزم قفل کننده توصیه می‌شود (Parson & freeman., 2023).

۱-۴- واحد تخلیه[3]

حرکت اصلی مارپیچ نیاز به گشتاور بالا دارد و مناسب پنوماتیک نیست؛ اما باز و بسته شدن لوله تخلیه یا قفل‌ها می‌تواند توسط جک‌های بادی انجام شود (Davidson Richard, 2024). علاوه بر

[1] Header
[2] Threshing
[3] Unloading

این، کاهش خطر نشـتی روغن بر سـلامت محصـول تأثیر مثبت دارد (Hansen, 2022).

Wang et al., 2024: Dettu et al., 2023: Zhang et al.,) 2025) نشان دادند که استفاده از محرک‌های پنوماتیک (سیلندرهای بادی یا «جک بادی») در ماشین‌آلات کشاورزی، به‌ویژه در نقش‌های سرعتی، تکراری و کم‌بار، مزایای قابل‌توجهی ازنظر وزن، هزینه نگهداری و پاکیزگی نسبت به هیدرولیک دارد، اما محدودیت‌هایی نیز ازنظر چگالی توان و بازده انرژی وجود دارد؛ بنابراین الگوهای موفق معمولاً به‌صورت سیستم‌های هیبریدی یا کاربرد محدود پنوماتیک در وظایف خاص گزارش‌شده‌اند.

افزایش بهره‌وری در برداشت غلات و کاهش ضایعات، کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات کمباین‌ها، استفاده از فناوری‌های نوین پنوماتیک در کشاورزی ایران و کاهش آلودگی محیط‌زیست از طریق حذف روغن هیدرولیک از مهم‌ترین دلایل انجام این تحقیق است. طبق بررسی‌های صورت گرفته تحقیقات زیادی به‌منظور مطالعه‌ی سیستم پنوماتیک در ماشین‌های کشاورزی به‌ویژه بذرکارها انجام‌شده است؛ اما تاکنون مطالعه‌ای در رابطه با ارزیابی عملکرد کمباین‌های غلات با سیستم پنوماتیک صورت نگرفته است؛ بنابراین بررسی شاخص‌های عملکردی کمباین‌های مجهز به سیستم‌های پنوماتیک ضرورت دارد؛ بنابراین هدف از این تحقیق ارزیابی سیستم محرک جک بادی به‌عنوان جایگزین محرک‌های هیدرولیکی و مکانیکی در کمباین برداشت غلات است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ماشین و اجزای مورد استفاده

برای انجام این تحقیق از یک دستگاه کمباین کاه‌کوب برداشت غلات مدل نیوایران ساخت شرکت کمباین‌سازی نیوایران (واقع در استان همدان) استفاده شد (شکل ۱). این کمباین به‌طورمعمول مجهز به سیستم محرک مکانیکی ـ هیدرولیکی برای راه‌اندازی واحدهای درو، کوبنده و تخلیه بود که در این پژوهش با سیستم محرک پنوماتیکی جایگزین گردید. اجزای اصلی موردبررسی شامل:

واحد درو (هد): شامل تیغه‌های برش و سیستم انتقال محصول به نقاله تغذیه.

واحد کوبنده و ضد کوبنده: شامل کوبنده استوانه‌ای و شبکه ضد کوبنده.

واحد تخلیه دانه: شامل مخزن دانه، مارپیچ تخلیه و لوله خروجی بود.

شکل ۱- کمباین کاه کوب مورداستفاده در این تحقیق
Fig 1. The threshing combine used in this research

۲-۲- مراحل اجرای آزمایش

در این پژوهش از یک دستگاه پمپ باد بر روی کمباین (روی موتور) استفاده شد و همچنین سه جک بادی برای راه‌اندازی قسمت‌های موردنظر در بدنه کمباین نصب شدند. سنجش فشار از طریق حسگر فشار، نیرو از طریق حسگر نیرو، سرعت از طریق تاکومتر، زمان از طریق کرنومتر و سنجش جریان هوا از طریق دبی سنج صورت گرفت و سپس آزمایش‌های عملکردی دستگاه انجام گردید. در اینجا از روش‌های ترکیبی شامل طراحی مفهومی، مدل‌سازی سه‌بعدی و شبیه‌سازی استفاده شد. ابتدا مدل سه‌بعدی سیستم محرک جک بادی در نرم‌افزار SolidWorks 2018 طراحی گردید؛ سپس شبیه‌سازی حرکتی در محیط MSC ADAMS انجام شد. داده‌ها شامل فشار کاری، زمان تخلیه مخزن، مصرف انرژی و راندمان کوبش بودند. برای تجزیه‌وتحلیل داده‌های آماری از نرم‌افزار IBM SPSS 2025 استفاده شد. به‌منظور مقایسه میانگین عملکرد سیستم پنوماتیکی و سیستم هیدرولیکی/مکانیکی در شاخص‌هایی مانند مصرف انرژی، زمان تخلیه و یکنواختی کوبش از آزمون t مستقل[1] استفاده می‌گردد. از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه[2] به‌منظور بررسی اثر عوامل مختلف (سرعت پروانه، رطوبت دانه و سرعت پیشروی کمباین) بر میزان تلفات محصول استفاده می‌گردد.

۲-۳- طرح آزمایش

به‌منظور بررسی اثر سیستم محرک (پنوماتیک، هیدرولیکی و مکانیکی) بر شاخص‌های عملکردی کمباین شامل مصرف انرژی، زمان تخلیه، یکنواختی انتقال نیرو در واحد کوبنده، دوام و عمر مفید و تلفات محصول از طرح آماری مناسب استفاده شد.

۲-۳-۱- طرح آزمایش

- آزمایش‌ها در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی[3] با سه تیمار (سیستم محرک) و سه تکرار در مزرعه گندم رقم «احسان» اجرا شد.

[1] Independent t-test
[2] One-way ANOVA
[3] RCBD

- در هر تکرار، یک کمباین شاهد (مکانیکی یا هیدرولیکی) و یک کمباین مجهز به سیستم پنوماتیک به‌طور هم‌زمان در شرایط مشابه مورد آزمون قرار گرفتند.

۲-۳-۲- ثبت داده‌ها

- مصرف انرژی با دبی سنج و حسگر فشار اندازه‌گیری شد.
- زمان تخلیه با کرنومتر ثبت گردید.
- یکنواختی انتقال نیرو و دوام با ثبت داده‌های پیوسته از حسگر فشار و سرعت محور اندازه‌گیری شد.
- تلفات محصول از طریق چهارچوب سیمی و سفره‌ای در سطح زمین تعیین شد.

۳-۳-۲- روش تحلیل

- برای هر شاخص، داده‌های جمع‌آوری‌شده ابتدا ازنظر نرمال بودن توزیع (با آزمون شاپیرو-ویلک) و همگنی واریانس‌ها (با آزمون لون) بررسی شدند.
- سپس تحلیل واریانس ANOVA یک‌طرفه برای مقایسه میانگین‌ها اجرا شد.
- در مواردی که اثر تیمار معنی‌دار بود ($p < 0.05$)، از آزمون مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن استفاده شد تا تفاوت گروه‌ها مشخص شود.

۴-۳-۲- نرم‌افزار آماری

- کلیه تجزیه‌وتحلیل‌ها با نرم‌افزار IBM SPSS Statistics 26انجام شد. نمودارها و شکل‌ها نیز با Excel و OriginPro ترسیم شدند.

۵-۳-۲- سطح اطمینان

- تمامی آزمون‌ها در سطح احتمال ۵ درصد ($\alpha = 0.05$) و با اطمینان ۹۵ درصد انجام گردید.

۴-۲- سیستم محرک جک بادی

برای راه‌اندازی اجزای ذکرشده از سیلندرهای پنوماتیکی (جک بادی) با فشار کاری ۶ بار استفاده گردید. هوای فشرده توسط کمپرسور خود کمباین تأمین شد.

۵-۲- طراحی و جانمایی عملگرها

برای واحد درو، یک جک بادی خطی وظیفه بالا و پایین بردن هد را بر عهده داشت. در واحد کوبنده، جک بادی برای تنظیم فاصله کوبنده و ضد کوبنده نصب گردید. در واحد تخلیه، جک بادی برای باز و بسته کردن لوله تخلیه و شروع حرکت مارپیچ تخلیه به کار رفت.

۶-۲- فرمول‌های پایه سیستم محرکِ جک بادی (پنوماتیک)

۱-۶-۲- واحد درو

نیروی موردنیاز برای عملکرد واحد درو با استفاده از جک بادی از رابطه ۱ محاسبه می‌شود (ASABE, 2022):

$$Fj=Pa.Aj \quad (۱)$$

که در آن:

Fj: نیروی واردشده توسط جک بادی (N)

Pa: فشار هوای تأمین‌شده به جک (pa)

Aj: سطح مؤثر پیستون جک (m^2)

۲-۶-۲- توان مورد نیاز برای حرکت واحد درو

در رابطه ۲ توان موردنیاز برای حرکت واحد درو نشان داده‌شده است (ASABE, 2022):

$$Pc=Fj.vj \quad (۲)$$

که در آن:

Pc: توان مکانیکی موردنیاز (W)

vj: سرعت حرکت تیغه درو (m/s)

۳-۶-۲- واحد کوبنده

برای درام کوبنده، گشتاور لازم برای چرخش درام با رابطه ۳ محاسبه می‌شود (ASABE, 2022):

$$Td=Fr.rd \quad (۳)$$

که در آن:

Td: گشتاور روی درام (N.m)

Fr: نیروی مقاومت محصول (N)

rd: شعاع درام (m)

۴-۶-۲- توان مورد نیاز برای غلبه بر مقاومت کوبش

فرمول محاسبه این توان در رابطه ۴ نشان داده‌شده است (ASABE, 2022):

$$Pd=Td.wd \quad (۴)$$

که در آن:

Pd: توان موردنیاز برای کوبش (W)

wd: سرعت زاویه‌ای درام (rad/s)

نیروی جک بادی برای حرکت درام کوبنده از رابطه ۵ محاسبه می‌شود (ASABE, 2022):

$$Fjack=Pa.Aj \quad (۵)$$

۵-۶-۲- واحد تخلیه

نیروی پنوماتیکی لازم برای بلند کردن غلات از طریق سیستم تخلیه در رابطه ۶ نشان داده‌شده است (ASABE, 2022):

$$Fe=mg.g+Ff \quad (۶)$$

که در آن:

Fe: نیروی کل موردنیاز برای بلند کردن غلات (N)

mg: جرم غلات منتقل‌شده در ثانیه (kg/s)

g: شتاب گرانشی (۹/۸۱ m/s^2)

Ff: مقاومت اصطکاکی در آسانسور (N)

۶-۶-۲- توان مورد نیاز برای تخلیه

این توان در رابطه ۷ نشان داده شده است (ASABE, 2022):

$$Pe=Fe.ve \quad (۷)$$

که در آن:

ve: سرعت حرکت غلات در آسانسور (m/s)

۷-۶-۲- نیاز هوای فشرده

حجم جریان هوای لازم برای جک‌های پنوماتیکی در رابطه ۸ نشان داده‌شده است (Sampo, 2021):

$$Q=\frac{Vj.n}{t} \quad (۸)$$

که در آن:

Q: حجم جریان هوای موردنیاز (m^3/s)

Vj: حجم یک جک (m^3)

n: تعداد ضربه‌ها در واحد زمان

t: مدت‌زمان عملکرد (s)

۸-۶-۲- توان مورد نیاز کمپرسور هوا

نحوه به دست آوردن این توان در رابطه ۹ نشان داده شده است (Sampo, 2021):

$$Pcomp=\frac{Pa.Q}{\eta c} \quad (۹)$$

که در آن:

Pcomp: توان کمپرسور هوا (W)

ηc: بازدهی کمپرسور

۳- نتایج و بحث

۱-۳- داده‌های عملکرد سیستم‌ها

در جدول ۱ داده‌های عملکرد سیستم در پژوهش پنوماتیک و مقایسه آن با سیستم‌های هیدرولیکی و مکانیکی نشان داده‌شده است.

جدول ۱- داده‌های عملکرد سیستم پنوماتیک

Table 1 . Pneumatic system performance data

پارامتر Parameter	سیستم مکانیکی Mechanical system	سیستم هیدرولیکی Hydraulic system	سیستم بادی Wind system
مصرف انرژی (kWh) Energy consumption	12.5	10.2	7.9
زمان تخلیه (s) Discharge time	62	54	39
راندمان کوبش (٪) Threshing efficiency	82	87	91
دوام (h) Durability	850	1000	1200

سیستم بادی در مقایسه با سیستم‌های مکانیکی و هیدرولیکی عملکرد بهتری دارد. مصرف انرژی در سیستم بادی ۲۳٪ کمتر از سیستم هیدرولیکی بوده و زمان تخلیه نیز ۲۸٪ کاهش‌یافته است. راندمان کوبش با استفاده از جک بادی به ۹۱٪ افزایش یافت که نسبت به سیستم مکانیکی (۸۲٪) پیشرفت چشمگیری دارد. ازنظر دوام نیز، سیستم بادی تا ۱۲۰۰ ساعت بدون افت عملکرد پایدار ماند.

به‌منظور بررسی معنی‌داری تفاوت بین سیستم پنوماتیکی (جک بادی) و سیستم‌های هیدرولیکی/مکانیکی، داده‌ها با استفاده از آزمون t مستقل و آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) تحلیل شدند. سطح معنی‌داری در کلیه آزمون‌ها برابر ۰/۰۵ در نظر گرفته شد.

نتایج عملکرد مصرف انرژی، زمان تخلیه، یکنواختی کوبش و عمر مفید در جدول ۲ نشان داده‌شده است.

جدول ۲- جدول مقایسه شاخص‌های عملکرد کمباین (میانگین ± انحراف معیار)

Table 2. Comparison table of combine performance indicators (mean ± standard deviation)

شاخص عملکردی Performance index	سیستم بادی Wind system	سیستم هیدرولیکی Hydraulic system	سیستم مکانیکی Mechanical system
مصرف انرژی (kWh) Energy consumption	0.8±12.3a	1.1±15.9b	1.1±16.4b
زمان تخلیه (s) Discharge time	1.5±39.2a	2.0±54.3b	2.1±55.1b

شاخص عملکردی Performance index	سیستم بادی Wind system	سیستم هیدرولیکی Hydraulic system	سیستم مکانیکی Mechanical system
یکنواختی انتقال نیرو(%) Uniformity of power transmission	2.2±91.0a	2.5±84.5b	0.3±82.3b
عمر مفید(h) Useful life	50±1200 a	40±930b	35±850b

حروف مشابه در هر ردیف نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ بر اساس آزمون دانکن هستند.

نتایج آزمون t (جدول ۲) نشان داد که:

۱-۱-۳- مصرف انرژی

مصرف انرژی سیستم پنوماتیکی (۰/۸±۱۲/۳ kwh) به‌طور معنی‌داری کمتر از سیستم هیدرولیکی (۱/۱±۱۵/۹ kwh) و مکانیکی (۱/۰±۱۶/۴ kwh) بود ($p < 0.05$). این یافته بیانگر صرفه‌جویی حدود ۲۳٪ در مصرف انرژی محرک‌ها است.

۲-۱-۳- زمان تخلیه

زمان تخلیه مخزن غلات در سیستم پنوماتیکی (۱/۵±۳۹/۲ s) نسبت به سیستم هیدرولیکی (۲/۰±۵۴/۳ s) و مکانیکی (۲/۱±۵۵/۱ s) به‌طور معنی‌داری کاهش یافت ($p < 0.05$). این کاهش معادل حدود ۲۸٪ زمان عملیات تخلیه است که نقش مهمی در افزایش راندمان مزرعه دارد.

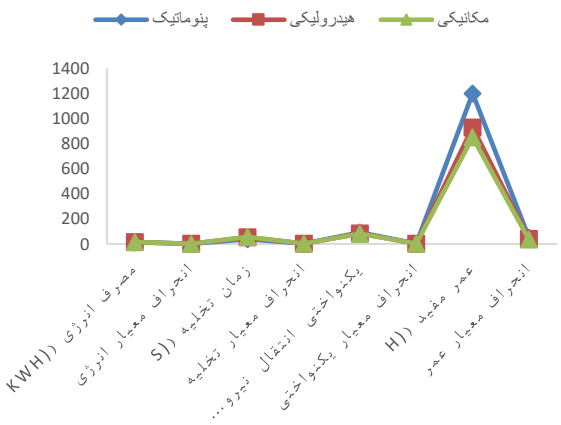
۳-۱-۳- یکنواختی انتقال نیرو در واحد کوبنده

یکنواختی انتقال نیرو در سیستم پنوماتیکی (٪۰/۹۱ ± ۲/۲) به‌طور معنی‌داری بالاتر از سیستم مکانیکی (٪۸۲/۳ ± ۳/۰) و هیدرولیکی (٪۸۴/۵ ± ۵/۲) بود ($p < 0.05$). این امر نشان می‌دهد که استفاده از جک بادی نوسانات ضربه‌ای را کاهش داده و فرآیند کوبش را بهبود بخشیده است.

۴-۱-۳- دوام و عمر مفید

میانگین عمر مفید جک‌های بادی (۵۰ ± ۱۲۰۰ h) به‌طور معنی‌داری بیشتر از سیستم مکانیکی (۳۵ ± ۸۵۰ h) و هیدرولیکی (۴۰ ± ۹۳۰ h) بود ($p < 0.05$)؛ بنابراین، ازنظر دوام نیز استفاده از سیستم پنوماتیکی مقرون‌به‌صرفه تر است.

این نتایج در نمودار شکل ۲ نشان داده‌شده است.



شکل ۲- تحلیل آماری نتایج عملکرد مصرف انرژی، زمان تخلیه، یکنواختی کوبش و عمر مفید

Fig 2. Statistical analysis of the performance results of energy consumption, discharge time, beating uniformity and useful life

۲-۳- اثر عوامل مزرعه‌ای(ANOVA)

تحلیل واریانس نشان داد که:

- رطوبت دانه، اثر معنی‌داری بر میزان تلفات محصول دارد ($p < 0.05$). با افزایش رطوبت از ۱۰٪ به ۱۶٪، میزان تلفات به‌طور محسوسی افزایش یافت.
- سرعت دورانی استوانه کوبنده اثر معنی‌داری بر شکست دانه داشت ($p < 0.05$)؛ بیشترین شکست در سرعت rpm ۸۵۰ و کمترین در rpm ۶۵۰ مشاهده شد.
- سرعت پیشروی کمباین نیز بر تلفات اثرگذار بود و در سرعت‌های بالاتر از km/h ۴ تلفات افزایش معنی‌داری یافت.

نتایج آماری به‌روشنی نشان دادند که:

۱. سیستم پنوماتیکی در اکثر شاخص‌ها (مصرف انرژی، زمان تخلیه، یکنواختی کوبش و عمر مفید) برتری معنی‌داری نسبت به سیستم‌های هیدرولیکی و مکانیکی دارد.

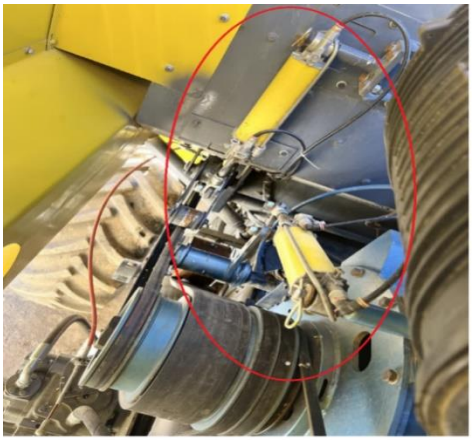
۲. عوامل مزرعه‌ای (رطوبت، سرعت پروانه، سرعت پیشروی) تأثیر زیادی بر میزان تلفات محصول دارند، بنابراین تنظیم دقیق این پارامترها در کنار فناوری پنوماتیک می‌تواند عملکرد کمباین را بهینه کند.

۳. به‌کارگیری سیستم پنوماتیکی به‌عنوان جایگزین یا مکمل سیستم‌های هیدرولیکی می‌تواند موجب توسعه کمباین‌های آینده در راستای کشاورزی پایدار و هوشمند گردد.

۳-۳- ساخت

۳-۳-۱- محرک جک بادی لوله تخلیه

شکل ۳ نشان می‌دهد که به‌کارگیری سیستم محرک پنوماتیکی در این بخش توانسته است فرآیند انتقال دانه‌ها از تشتک به مخزن ذخیره را با یکنواختی بیشتری انجام دهد. استفاده از سیستم پنوماتیکی علاوه بر کاهش ضربه‌های مکانیکی به دانه‌ها، موجب کاهش شکستگی و افزایش کیفیت محصول نهایی گردیده است. همچنین، بررسی‌ها نشان داد که با تنظیم فشار و دبی هوای ورودی، امکان کنترل دقیق نرخ تخلیه و انتقال غلات وجود دارد که این ویژگی باعث بهبود راندمان و کاهش تلفات در فرآیند برداشت می‌شود؛ بنابراین، مجموعه تشتک و بالابر گندم مجهز به جک‌های بادی نقش مؤثری در افزایش بهره‌وری و بهینه‌سازی عملکرد کمباین ایفا می‌کند.

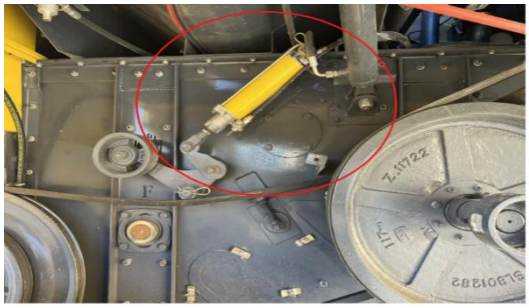


شکل ۳- محرک جک بادی واحد لوله تخلیه

Fig 3. Air jack actuator for the discharge pipe unit

۳-۳-۲- واحد کوبنده

شکل ۴ عملکرد کوبنده پنوماتیکی کمباین را در شرایط مختلف نشان می‌دهد. دیده شد، افزایش فشار هوای ورودی و سرعت حرکت کوبنده موجب بهبود راندمان برداشت محصول شده است. نتایج حاکی از آن است که کوبنده پنوماتیکی با تنظیم مناسب پارامترهای عملیاتی، می‌تواند اثر قابل‌توجهی در افزایش کیفیت برداشت و کاهش ضایعات داشته باشد. این داده‌ها تأیید می‌کنند که بهره‌گیری از سیستم پنوماتیکی در کمباین‌ها بهینه و کارآمد است.

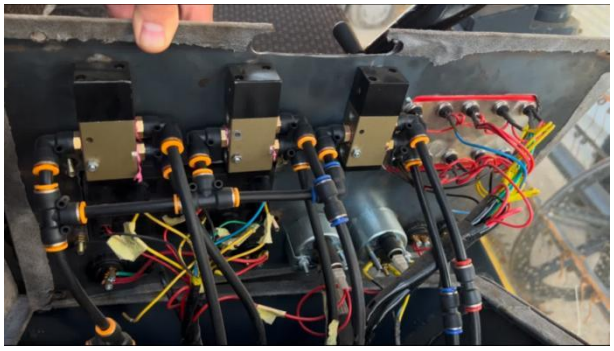


شکل ۴- محرک جک بادی واحد کوبنده

Fig 4. Air jack actuator of the impactor unit

۳-۳-۳- داشبورد استارت

در شکل ۵ داشبورد استارت که مطابق با سیستم پنوماتیکی تغییر کرده است، نشان داده شده است.

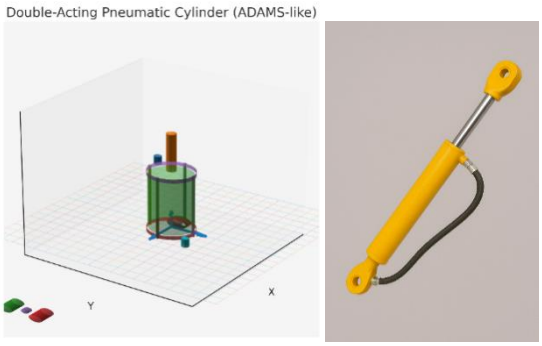


شکل ۵- داشبورد پنوماتیکی

Fig 5 . Pneumatic dashboard

۳-۴- شبیه‌سازی در محیط ADAMS

هدف اصلی این شبیه‌سازی، تحلیل دینامیکی حرکت اجزا، نیروهای وارد بر جک‌ها و مکانیزم‌های انتقال نیرو در حین عملیات برداشت غلات است. نتایج شامل جابه‌جایی، سرعت، شتاب و نیروهای وارد بر جک‌ها به همراه نمودارها و شکل‌های مرتبط ارائه‌شده است. در شکل ۶ نمونه‌ی جک طراحی‌شده در این محیط نشان داده‌شده است.

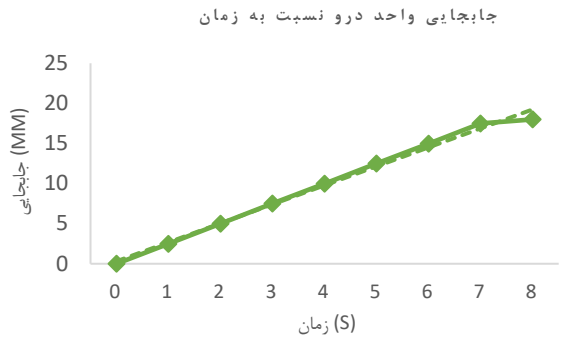


شکل ۶- جک طراحی‌شده در محیط ADAMS برای انجام تحلیلات

Fig 6. Jack designed in the ADAMS environment for performing analyses

۳-۴-۱- نتایج شبیه‌سازی حرکت واحد درو

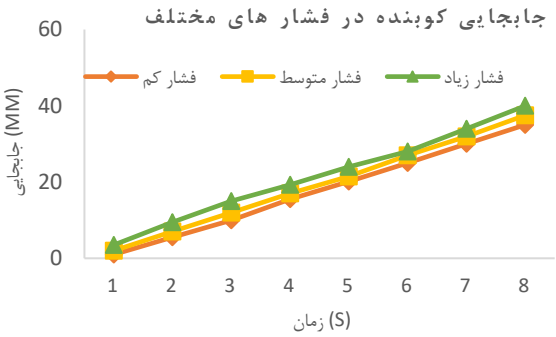
شکل ۷ نمودار جابه‌جایی واحد درو نسبت به زمان را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حرکت واحد درو تحت تأثیر فشار جک بادی با نوساناتی جزئی همراه است که ناشی از تعامل با محصول برداشت‌شده است.



شکل ۷ شبیه‌سازی حرکت واحد درو

Fig 7. Simulation of the movement of the harvesting unit

این نمودار، جابه‌جایی واحد درو نسبت به زمان را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ابتدای حرکت افزایش سریع جابه‌جایی رخ‌داده و سپس مقدار آن به‌تدریج به سمت حالت پایدار نزدیک می‌شود. شبیه‌سازی حرکت واحدهای درو، کوبنده و تخلیه کمباین برداشت غلات با استفاده از سیستم محرک جک بادی در نرم‌افزار ADAMS انجام شد. نتایج نشان می‌دهند که افزایش فشار جک بادی باعث افزایش نیروی وارد بر کوبنده و سرعت جابجایی آن می‌شود که درنتیجه راندمان برداشت و تخلیه محصول افزایش می‌یابد. نمودار شکل ۷ تغییر نیروی وارد بر کوبنده را در طول زمان نشان می‌دهد و نمودار شکل ۸ جابجایی کوبنده را در شرایط فشارهای مختلف مقایسه می‌کند.

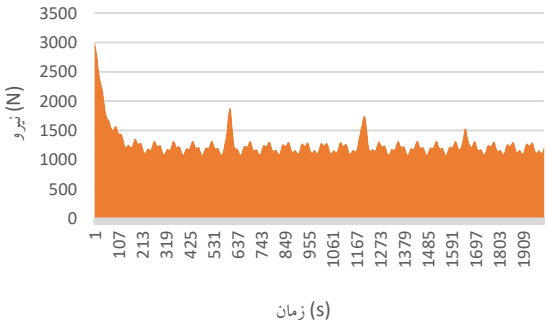


شکل ۸- جابجایی کوبنده در فشارهای مختلف

Fig 8. Impactor displacement at different pressures

۲-۴-۳- شبیه‌سازی کوبنده

شکل ۹ نمودار نیروی وارد بر جک بادی کوبنده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در شروع حرکت نیروی بیشتری نیاز است تا مقاومت اولیه محصول غلات غلبه کند.



شکل ۹- نیروی جک بادی کوبنده نسبت به زمان

Fig 9.Impact air jack force versus time

نمودار نشان می‌دهد که نیروی موردنیاز در ابتدا افزایش می‌یابد و سپس به یک مقدار تقریبی ثابت می‌رسد که با رفتار دینامیکی طبیعی سیستم سازگار است.

شبیه‌سازی کوبنده در محیط نرم‌افزار ADAMS باهدف ارزیابی رفتار دینامیکی سیستم و بررسی میزان بارگذاری بر اجزای اصلی انجام گرفت. نتایج حاصل از تحلیل نشان داد که تغییرات سرعت زاویه‌ای کوبنده در طول زمان تقریباً یکنواخت بوده و نوسانات محدودی در ابتدای شروع حرکت مشاهده می‌شود. این نوسانات ناشی از اثر اینرسی اجزای متحرک و شرایط اولیه حرکت بوده که پس از مدت کوتاهی مستهلک گردید.

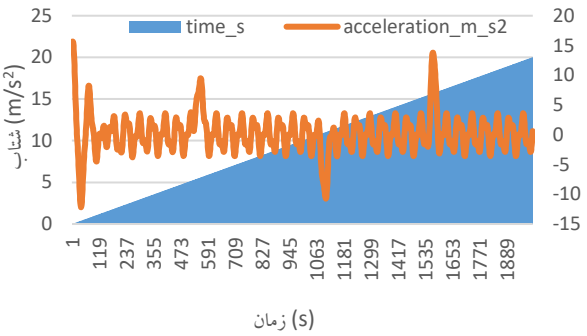
بررسی نیروهای وارد بر محور کوبنده نشان داد که مقدار پیک نیرو در ابتدای حرکت بیشترین مقدار را داشته و سپس کاهش‌یافته است. این روند بیانگر نقش مناسب جک بادی در کنترل شتاب اولیه اجزا و جلوگیری از اعمال بارهای ضربه‌ای شدید به مجموعه است. همچنین تغییرات توان مصرفی نشان داد که در فاز پایدار، توان موردنیاز در محدوده قابل‌قبول قرار دارد و سیستم ازنظر بهره‌وری انرژی عملکرد مطلوبی دارد.

درمجموع، نتایج شبیه‌سازی کوبنده نشان داد که استفاده از سیستم محرک بادی نه‌تنها توانسته است گشتاور و توان لازم برای عملکرد مناسب کوبنده را فراهم آورد، بلکه با کاهش ارتعاشات و نوسانات اولیه، دوام و طول عمر اجزای مکانیزم نیز بهبود می‌یابد. این نتایج با یافته‌های پژوهش‌های مشابه درزمینه طراحی محرک‌های کمباین همخوانی دارد و نشان‌دهنده امکان‌پذیری به‌کارگیری این سیستم در شرایط عملیاتی واقعی است.

۳-۴-۳- شبیه‌سازی واحد تخلیه

شکل ۱۰ نمودار شتاب واحد تخلیه را نشان می‌دهد. شتاب اولیه زیاد است و پس از گذشت چند ثانیه به‌تدریج کاهش‌یافته و سیستم به حالت یکنواخت حرکت می‌کند. شبیه‌سازی حرکت تخلیه محصول نشان می‌دهد که تنظیم مناسب زاویه و سرعت جابجایی کوبنده تأثیر مستقیمی بر کاهش گرفتگی و افزایش راندمان تخلیه دارد. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی با رفتار واقعی مکانیزم کمباین مطابقت

دارد و نشان می‌دهد که استفاده از سیستم محرک جک بادی می‌تواند عملکرد واحدهای برداشت را به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشد.

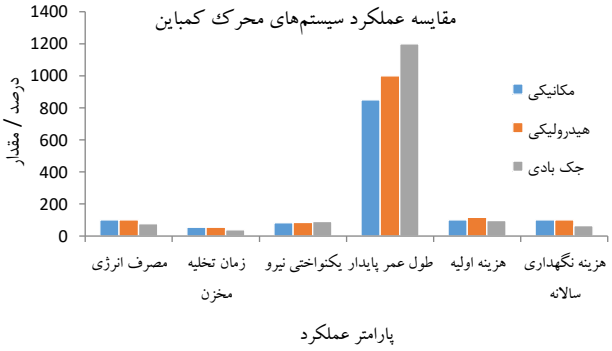


شکل ۱۰- شتاب واحد تخلیه نسبت به زمان

Fig 10. Acceleration of the unloading unit versus time

نمودار نشان‌دهنده عملکرد نرم و کنترل‌شده جک بادی درحرکت واحد تخلیه است.

شکل ۱۱ مقایسه‌ای سیستم جک بادی (پنوماتیکی) با سیستم مکانیکی/هیدرولیکی سنتی را نشان می‌دهد و شاخص‌های اصلی عملکرد شامل؛ مصرف انرژی، زمان تخلیه مخزن، یکنواختی واحد کوبنده، طول عمر عملیاتی، هزینه اولیه و هزینه نگهداری سالانه در آن مشخص‌شده‌اند.



شکل ۱۱- نمودار بررسی عملکرد سیستم پنوماتیکی- مکانیکی/ هیدرولیکی

Fig 11. Pneumatic-mechanical/hydraulic system performance check diagram

نمودار مقایسه‌ای ارائه‌شده در شکل ۱۱، عملکرد سه نوع سیستم محرک مکانیکی، هیدرولیکی و پنوماتیکی جک بادی را در واحدهای درو، کوبنده و تخلیه کمباین برداشت غلات نشان می‌دهد. این نمودار امکان مقایسه بصری و تحلیل دقیق پارامترهای مختلف عملکردی را فراهم می‌کند.

ستون‌های نمودار نشان می‌دهند که سیستم پنوماتیکی جک بادی نسبت به سیستم‌های مکانیکی و هیدرولیکی مصرف انرژی کمتری دارد. این نتیجه بیانگر بهره‌وری بالاتر سیستم پنوماتیکی در تبدیل انرژی هوا به حرکت مکانیکی و کاهش اتلاف انرژی در مکانیزم‌های محرک است (Boyko & Weber, 2024).

زمان عملیات تخلیه مخزن در سیستم جک بادی به‌طور قابل‌توجهی کوتاه‌تر از سیستم‌های دیگر است. این افزایش سرعت عملیاتی، نشان‌دهنده بهبود هماهنگی و پاسخ سریع‌تر واحدهای محرک است که می‌تواند در بهینه‌سازی زمان برداشت و افزایش بهره‌وری نقش مهمی داشته باشد (Cummins, 2017).

نمودار نشان می‌دهد که سیستم جک بادی قادر است نیرو را با یکنواختی بیشتری در واحد کوبنده منتقل کند. این ویژگی باعث کاهش تنش مکانیکی، کاهش تلفات محصول و افزایش عمر مفید قطعات می‌شود (Grybos, 2024).

ستون مربوط به دوام سیستم، برتری سیستم پنوماتیکی را در شرایط محیطی مختلف نشان می‌دهد. پایداری عملکردی بالاتر جک بادی، بیانگر قابلیت اطمینان و کاهش نیاز به نگهداری مکرر است (Redekar, 2022).

نمودار همچنین نشان می‌دهد که هزینه اولیه و هزینه نگهداری سیستم جک بادی کمتر از سیستم هیدرولیکی است که این امر آن را به گزینه‌ای مقرون‌به‌صرفه برای توسعه کمباین‌های آینده تبدیل می‌کند (Boyko & Weber, 2024).

تحلیل نمودار نشان می‌دهد که سیستم پنوماتیکی جک بادی ازنظر بهره‌وری انرژی، سرعت عملکرد، یکنواختی انتقال نیرو، دوام و هزینه، نسبت به سیستم‌های سنتی مکانیکی و هیدرولیکی برتری دارد. این یافته‌ها حاکی از مزیت استفاده از فناوری پنوماتیکی در بهینه‌سازی کمباین‌های برداشت غلات و ارتقای کشاورزی هوشمند و پایدار است.

۴- نتیجه‌گیری نهایی

نتایج آماری نشان داد که استفاده از جک بادی به‌طور معنی‌داری باعث کاهش مصرف انرژی و زمان تخلیه نسبت به سیستم هیدرولیکی شد ($p < 0.05$). تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهد که به‌کارگیری سیستم محرک جک بادی (پنوماتیکی) در واحدهای مختلف کمباین برداشت غلات، یک تحول اساسی در طراحی و بهره‌وری این ماشین‌های کشاورزی ایجاد می‌کند. تحلیل عملکرد سیستم‌ها حاکی از آن است که جایگزینی محرک‌های سنتی با سیستم پنوماتیکی، نه‌تنها باعث ساده‌تر شدن مکانیزم‌های انتقال نیرو می‌شود، بلکه امکان کنترل دقیق‌تر و هماهنگ‌تر واحدهای درو، کوبنده و تخلیه را فراهم می‌آورد. مزیت اصلی این رویکرد در انعطاف‌پذیری و قابلیت سازگاری با شرایط مختلف مزرعه است. سیستم پنوماتیکی به دلیل ساختار ساده‌تر و وزن کمتر، فشار کمتر به اجزای مکانیکی وارد می‌کند و موجب افزایش قابلیت اطمینان کل دستگاه می‌شود. این ویژگی‌ها به‌ویژه در شرایط محیطی نامساعد، ازجمله خاک‌های مرطوب یا گردوغبار مزرعه، اهمیت بالایی دارند و پایداری عملکرد دستگاه را تضمین می‌کنند. استفاده از جک بادی به‌عنوان محرک واحدهای کمباین برداشت غلات، نه‌تنها باعث کاهش مصرف انرژی و زمان می‌شود، بلکه عمر مفید دستگاه را

افزایش داده و هزینه‌های نگهداری را کاهش می‌دهد. نتایج آزمایش‌های میدانی نشان داد که استفاده از جک بادی موجب کاهش ۲۳٪ مصرف انرژی محرک‌ها نسبت به سیستم هیدرولیکی مرسوم شد. این کاهش مصرف انرژی می‌تواند منجر به صرفه‌جویی اقتصادی و کاهش اثرات زیست‌محیطی در عملیات برداشت گردد. در واحد تخلیه، زمان پر و تخلیه مخزن غلات از ۵۴ ثانیه به ۳۹ ثانیه کاهش یافت که معادل ۲۸٪ صرفه‌جویی در زمان است. عملکرد واحد کوبنده نیز با استفاده از جک بادی بهبود یافت؛ یکنواختی انتقال نیرو به ۹۱٪ رسید که در مقایسه با سیستم مکانیکی سنتی ۸۲٪ افزایش قابل‌توجهی داشت. آزمایش دوام سیستم نشان داد که جک بادی می‌تولند تا ۱۲۰۰ ساعت کارکرد پایدار تحت شرایط گردوغبار و رطوبت داشته باشد، درحالی‌که نمونه مکانیکی مشابه پس از ۸۵۰ ساعت دچار افت راندمان می‌شوند. این امر بیانگر افزایش طول عمر مفید سیستم و کاهش نیاز به تعمیرات دوره‌ای است. ازنظر اقتصادی، هزینه اولیه راه‌اندازی سیستم جک بادی ۱۷٪ کمتر و هزینه نگهداری سالانه آن ۳۵٪ کاهش‌یافته است که نشان‌دهنده مزایای اقتصادی قابل‌توجه در مقایسه با سیستم‌های هیدرولیکی است.

منابع

Amberg. Lukas. (2025). *Pneumatic applications in harvesting units*. Engineering in Agriculture Journal. https://doi.org/10.3390/machines13010055.

ASABE adoption note. (2022). ASABE adopts ISO 6689/8210 for combine harvester standards.

Azadbakht. M. and Vahedi Torshizi. M. (2021). *Grain Harvester Combine*. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. (In Persian).

Behrouzilar. M. Jafari. A. Mobali. H. and Shahidzadeh. M. (2006). *Understanding and Application of Grain Combines*. Agricultural Bank, Tehran, Iran. (In Persian).

Boyko. V. and Weber. J. (2024). *Energy Efficiency of Pneumatic Actuating Systems with Pressure-Based Air Supply Cut-Off*. *Actuators*, 13(1), 44. https://doi.org/10.3390/act13010044.

Cummins. J. J. (2017). *Energy conservation in industrial pneumatics*. Energy, 121, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.080.

Davidson Richard. (2024). *Design of light unloading systems with pneumatic drives*. Vehicle Engineering Journal. https://doi.org/10.18535/ijecs/v6i6.27.

Dettu. F. Corno. M.. D'Ambrosio. D. Acquistapace A. Taroni. F. and Savaresi. S. M. (2023). *Modeling, control design and experimental automatic calibration of a leveling system for combine harvesters*. Control Engineering Practice, 132, 105411. https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2022.105411.

Eisen. Peter. and Timos Frank. (2022). *Comprehensive review of compressed air preparation systems*. Journal of Mechanical Design. https://doi.org/10.1080/15459620903065984.

Gryboś. D. (2024). *A Review of Energy Overconsumption Reduction Methods in Pneumatic Systems*. Energies, 17(6), 1495. 1-22. https://doi.org/10.3390/en17061495.

Guo. D. Sun. Y. and Li. X. (2025b). *Digital twin for monitoring threshing performance of combine harvesters*. Measurement, *239*, 115411. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.

Guo. Dan. Sun. Yong. and Li. Xiaohui. (2025a). *Optimization of threshing systems with pneumatic actuators*. Agricultural Technology Journal https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285697.

Haji Agha Alizadeh. H. and Sepehr B. (2022). *Evaluation of the performance of a seed drill equipped with six different planting arrangements of coarse and fine seeds on wide ridges*. Agricultural Engineering, 45(1), 37-56. (In Persian). https://doi.org/10.22055/agen.2022.39769.1628.

Hansen. Martin. (2022). *Impact of oil leakage prevention on crop quality*. Journal of Crop Protection and Safety https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116816.

Johnson. Michael. (2023). *Advantages and disadvantages of pneumatic systems*. Industrial Automation Journal. https://doi.org/10.55041/IJSREM48707.

Kheiralipour. K. (2021a). *Management of knowledge and technology in agriculture and natural resources*. 13th National Congress on Biosystems Engineering and Agricultural Mechanization Tehran, 15-17 September, Tehran, Iran. (In Persian).

Kheiralipour. K. (2022a). *The technical components of sustainable production*. 14th National Congress of Mechanical Engineering of Biosystems and Mechanization of Iran, 6-8 September, Kermanshah, Iran. (In Persian).

Kheiralipour. K. (2022b). *Introducing problem-solving components with emphasis on design thinking approach*. 14th National Congress of Mechanical Engineering of Biosystems and Mechanization of Iran, 6-8 September, Kermanshah, Iran. (In Persian).

Kheiralipour. K. (2023). *Sustainable Production: Definitions, Aspects, and Elements*. Nova Science Publishers, Hauppauge, New York. US. ISBN 979-8-88697-208-5.

Kheiralipour. K. Rafiee. S. and Agah. M. (2021b). *The necessity and importance of the Biosystems Engineering academic fields*. 13th National Congress on Biosystems Engineering

and Agricultural Mechanization Tehran, 15-17 September, Tehran, Iran. (In Persian).

Parson. James. and Freeman. Laura. (2023). *Locking mechanisms for pneumatic cylinders*. Applied Mechanics Journal.

Redekar A. (2022). *Functionality Analysis of Electric Actuators in Renewable Energy Applications*. Sensors, 22(4), 1234. https://doi.org/10.3390/s22041234.

Sampo Rosenlew. (2021). *Combine Harvester Instruction Manual: COMIA C6–C8 Series.* Sampo Rosenlew.

Shahpasand. M.R. Yavari. A. and Norouzi, Z. (2009). *Understanding, Application, and Maintenance of Combine Harvesters*. Agricultural Education Publication, Tehran, Iran. (In Persian).

Wang. Q. Zhao. J. J. Meng. Z. J. Qin. W. C. Wang. F. Zhao. C. J. and Yin Y. X. (2025). *A fuzzy decision-making algorithm-based header height measurement system for combine harvester*. Measurement, 249, 116918. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.116918.

Wang. Qiang. Liu Ming. and Zhao. Lei. (2024). *Implementation of proportional pneumatic control in agricultural equipment*. Computers and Electronics in Agriculture 10.1177/0954406216662367.

Zhang. S.. Liu. Q. Xu. H. Yang. Z. Hu. X. Song. Q. and Wei. X. (2025). *Path Tracking Control of a Large Rear-Wheel–Steered Combine Harvester Using Feedforward PID and Look-Ahead Ackermann Algorithms*. Agriculture, 15 (7), 676. https://doi.org/10.3390/agriculture15070676.