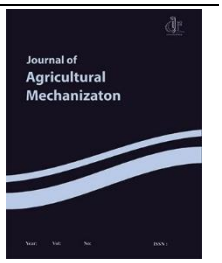
J. Agric. Mech., 11 (2):1-13(2026)

1947
UNIVERSITY OF TABRIZ

Journal of
Agricultural Mechanization

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



Original Article

Development and Implementation of Electro-Pneumatic Control Systems for Mechanized Operation of Combine Harvester Functional Units

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

1- Department of Biosystem, Faculty of Agriculture, University of bu-ali sina, Hamedan, Iran.

ARTICLE INFO

***Keywords*:**
Agricultural Mechanization,
Automatic Control,
Combine Harvester,
Electropneumatic System,
Smart Harvesting

Received:
2026-02-23

Revised:
2026-07-24

Accepted:
2026-07-25

***Corresponding Author:**
m.jaberimoez@basu.ac.ir

ABSTRACT

Introduction

Grain harvesters, as one of the most complex agricultural machines, have numerous subsystems whose precise control plays a decisive role in reducing harvest losses, increasing crop quality, and improving operator ergonomics. In many conventional combines, parts such as the platform, real, thresher, and grain discharge mechanism are controlled mechanically or hydraulically, reduce control accuracy. Advances in pneumatic and electrical systems have made it possible to control these parts with higher accuracy, greater safety, and more appropriate automation capabilities. The purpose of this paper is to present a comprehensive structure for the setup and evaluation of a combined electric-pneumatic system in wheat harvesters. In recent years, advanced mechanization in harvesting machines, especially grain combines, has become one of the central issues in increasing productivity and reducing cost per unit area. Currently, many domestic combines use traditional mechanical or hydraulic systems to perform the operations of raising and lowering the harvesting platform, controlling the reals, and discharging straw and wheat, which have limitations such as response delay, oil leakage, high energy consumption, and increased component wear.

Materials and Methods

In this study, a hybrid electric-pneumatic control system was designed, simulated, and implemented for four key parts of the combine harvester: 1- platform raising and lowering, 2- fork control (horizontal and vertical movement), 3- straw control, and 4- wheat discharge through the outlet pipe. In the present design, the electric control circuit is combined with a PLC control unit and pneumatic actuators including solenoid valves and double-way cylinders to achieve accurate and fast control of movements. The system was modeled in MATLAB/Simulink software and tested in a practical environment with position and pressure sensors. This system was designed and manufactured at the Sabzabad Hegmataneh Combine Harvester Factory in Hamadan (New Iran) and field tested in the wheat fields of Shurin village, Hamadan city. The proposed system consists of an electrical control circuit and a pneumatic power circuit. The control circuit consists of an industrial PLC unit, cabin control switches, relays, and a 24V power supply module. The pneumatic circuit consists of an air compressor, a storage tank, a air monitoring unit (FRL), 5/2 solenoid valves, and two-way cylinders.

Results and Discussion

The results of this study demonstrated that the proposed electro-pneumatic control system significantly improved the dynamic and operational performance of the combine harvester. Field experiments showed that the average response time of the controlled mechanisms was reduced to less than 0.8 s, representing a considerable improvement compared to conventional hydraulic systems. MATLAB/Simulink simulations

How to cite:
Yremtaghlu, E. Jaberi Moeaz, M.(2026). *Development and Implementation of Electro-Pneumatic Control Systems for Mechanized Operation of Combine Harvester Functional Units.*Journal of Agricultural Mechanization, 11 (2):1-13.
https://doi.org/10.22034/jam.2026.71682.1353

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

OPEN ACCESS

confirmed the faster transient response and higher stability of pneumatic actuators under PLC-based control. Energy consumption measurements indicated a reduction of approximately 23% relative to the hydraulic counterpart. Furthermore, positioning accuracy was enhanced, with a maximum error below 3%. Vibration analysis revealed a reduction of nearly 30%, leading to lower mechanical stress and extended component lifespan. The overall system reliability reached 0.93, exceeding that of typical domestic combine harvesters. These results confirm the feasibility of electro-pneumatic systems as an effective solution for upgrading conventional harvesting machines and enabling future intelligent control applications.

Conclusion

The results show that integrating electro-pneumatic actuators with PLC-based control effectively addresses key limitations of conventional hydraulic systems in combine harvesters. Faster response times are mainly due to the lower inertia of pneumatic actuators and direct on–off solenoid valve control, which removes delays from fluid compressibility and hydraulic pump circuits. Good agreement between MATLAB/Simulink simulations and field measurements confirms the validity of the dynamic model and the accuracy of the proposed control architecture. Overall energy consumption is reduced by eliminating continuously running hydraulic pumps and leakage losses. The electro-pneumatic system also improves positioning accuracy through closed-loop control with position sensors and reduces vibration by providing smoother motion, lowering impact loads and extending component service life. With a reliability index of 0.93 and successful real-world testing, the system is technically feasible and suitable for industrial use. Overall, it is a promising, cost-effective alternative for modernizing domestic combine harvesters and supports future intelligent, sensor-based control and IoT applications.

Acknowledgement

Thanks to the staff and personnel of New Iran Combine Harvester Company (Sabzabad Hegmataneh).

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



مقاله پژوهشی

راه‌اندازی تقسیم کمباین به‌صورت برقی و بادی برای کنترل مکانیزه‌ی اجزای عملکردی

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۰۲ تاریخ پذیرش:۱۴۰۵/۰۵/۰۳

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

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

چکیده

در سال‌های اخیر، مکانیزاسیون پیشرفته در ماشین‌های برداشت به‌ویژه کمباین‌های غلات، به یکی از موضوعات محوری در افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه در واحد سطح تبدیل‌شده است. در شرایط فعلی، بسیاری از کمباین‌های داخلی از سیستم‌های مکانیکی یا هیدرولیکی سنتی برای انجام عملیات بالا و پایین کردن پلتفرم برداشت، کنترل چنگالی، تخلیه‌ی کاه و گندم استفاده می‌کنند که دارای محدودیت‌هایی چون تأخیر در پاسخ، نشت روغن، مصرف بالای انرژی و افزایش سایش اجزا هستند. در این پژوهش، یک سامانه‌ی کنترل ترکیبی برقی–بادی برای چهار بخش کلیدی کمباین طراحی، شبیه‌سازی و اجرا شد: ۱- بالا و پایین کردن پلتفرم، ۲- کنترل چنگالی (حرکت افقی و عمودی)، ۳- کنترل کاه کوب و ۴- تخلیه‌ی گندم از طریق لوله‌ی خروجی. در طراحی حاضر، مدار فرمان الکتریکی با واحد فرمان PLC و عملگرهای بادی شامل شیرهای سلونوئیدی و سیلندرهای دوطرفه ترکیب‌شده است تا کنترل دقیق و سریع حرکت‌ها حاصل شود. سیستم در نرم‌افزار MATLAB/Simulink مدل‌سازی و در محیط عملی با حسگر موقعیت و فشار آزمایش شد. این سامانه در کارخانه کمباین سازی نیوایران (سبزآباد هگمتانه) همدان طراحی و ساخته شد و در مزارع گندم روستای شورین از توابع شهرستان همدان مورد آزمون میدانی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که سامانه پیشنهادی ازنظر زمان پاسخ، مصرف انرژی، دقت کنترلی و قابلیت اطمینان عملکرد، به‌طور معناداری نسبت به سیستم‌های هیدرولیکی متداول برتری دارد. زمان پاسخ کمتر از ۰/۸ ثانیه، مصرف انرژی کل سیستم در مقایسه با مدار هیدرولیکی مشابه ۲۳٪ کاهش و راندمان کلی عملکرد مکانیزم‌ها ۱۷٪ افزایش یافت. ضریب قابلیت اطمینان به ۰/۹۳ رسید که نسبت به میانگین کمباین‌های تولید داخلی (۰/۷۴) بهبود قابل‌ملاحظه‌ای را نشان داد و افزایش دقت موقعیت تا سطح خطای کمتر از ۳٪ نسبت به سیستم هیدرولیکی سنتی به دست آمد. نتایج تجربی همچنین بیانگر کاهش محسوس لرزش و افزایش طول عمر اجزای مکانیکی تا ۳۰٪ بود.

کلمات کلیدی: برداشت هوشمند، سیستم الکترونیوماتیک، کمباین، کنترل خودکار، مکانیزاسیون کشاورزی

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

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، مکانیزاسیون پیشرفته در ماشین‌های برداشت کشاورزی به‌ویژه کمباین‌های غلات، به‌عنوان یکی از مؤثرترین راهکارها برای افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌های تولید و بهبود پایداری سامانه‌های زراعی مطرح‌شده است. کمباین‌ها به دلیل انجام هم‌زمان عملیات درو، خرمن‌کوبی، جداسازی و انتقال محصول، نقش کلیدی در کاهش تلفات برداشت و افزایش راندمان عملیات مزرعه‌دارند. بااین‌حال، در بسیاری از کمباین‌های متداول، به‌ویژه در تولیدات داخلی، کنترل بخش‌های عملکردی نظیر بالا و پایین کردن پلتفرم، تنظیم چنگالی، تخلیه کاه و دانه عمدتاً مبتنی بر سیستم‌های مکانیکی یا هیدرولیکی سنتی است که محدودیت‌هایی نظیر تأخیر در پاسخ، نشتی سیال، مصرف انرژی بالا و افزایش استهلاک اجزای مکانیکی را به همراه دارند (Srivastava et al., 2023).

مطالعات اخیر نشان می‌دهد که اتوماسیون و کنترل پیشرفته در ماشین‌آلات کشاورزی می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش دقت عملکرد، کاهش نیروی انسانی موردنیاز و بهینه‌سازی مصرف انرژی ایفا کند. Jiang et al (2025) در یک مطالعه مروری جامع بیان کردند که استفاده از سامانه‌های کنترلی پیشرفته، حسگرهای دقیق و عملگرهای الکتریکی و نیوماتیکی موجب افزایش کارایی و کاهش خطاهای عملیاتی در ماشین‌های برداشت می‌شود. همچنین، توسعه سامانه‌های هوشمند در کمباین‌ها به‌عنوان یکی از روندهای اصلی مکانیزاسیون نوین مطرح‌شده است که قابلیت کنترل تطبیقی و واکنش سریع به شرایط متغیر مزرعه را فراهم می‌کند (Li et al., 2025).

در این میان، جایگزینی یا تکمیل سیستم‌های هیدرولیکی با سامانه‌های الکتریکی و نیوماتیکی به‌عنوان راهکاری مؤثر برای بهبود عملکرد دینامیکی و افزایش قابلیت اطمینان ماشین‌ها معرفی‌شده است. Etezadi & V Eshkabilov (2024) گزارش کردند که استفاده از عملگرهای بادی و کنترل الکتریکی، ضمن کاهش پیچیدگی مکانیکی، موجب افزایش دقت موقعیت‌یابی، کاهش لرزش و بهبود ایمنی عملیاتی می‌شود. علاوه بر این، تحقیقات مرتبط با برقی سازی ماشین‌آلات کشاورزی نشان داده‌اند که کاهش مصرف انرژی و افزایش راندمان سیستم از مهم‌ترین مزایای این رویکرد است (Ilbas, 2024).

از منظر مهندسی سیستم، ترکیب کنترل برقی و نیوماتیکی[1] امکان دستیابی به زمان پاسخ کوتاه‌تر، کاهش تلفات انرژی و افزایش طول عمر اجزای مکانیکی را فراهم می‌کند. Pan et al (2025) نشان دادند که بهینه‌سازی سامانه‌های کنترلی در ماشین‌های برداشت، تأثیر مستقیمی بر کاهش ارتعاشات، افزایش پایداری عملکرد و بهبود کیفیت برداشت دارد. افزون بر این، توسعه چنین سامانه‌هایی بستر مناسبی برای ادغام با فناوری‌های هوشمند نظیر حسگرهای موقعیت، سیستم‌های پایش لحظه‌ای و اینترنت اشیاء (IoT) فراهم می‌آورد که از الزامات کشاورزی دقیق در دهه‌های اخیر محسوب می‌شود (ASABE, 2024). در سال‌های پایانی دهه‌ی ۲۰۲۰، جهت‌گیری جهانی به سمت اتوماسیون هوشمند کشاورزی[2] حرکت کرده است که در آن حسگرهای موقعیت، فشار و دما به سامانه‌های اینترنت اشیاء (IoT) متصل می‌شوند (Al-Sabbagh et al., 2025). در چنین چارچوبی، ترکیب کنترل الکتریکی با عملگرهای بادی ارزان‌قیمت، مسیر توسعه «کمباین‌های هوشمند بومی» را در کشورهای درحال‌توسعه فراهم می‌کند.

در سیستم‌های دستی، انجام هم‌زمان این اعمال نیاز به نیروی انسانی قابل‌توجه دارد و احتمال خطا و تأخیر در پاسخ بالا است. در مقابل، استفاده از واحد فرمان PLC برای صدور سیگنال‌های کنترلی و عملگرهای بادی (شامل شیرهای سلونوئیدی و سیلندرهای دوطرفه) قابلیت کنترل دقیق و نرم را فراهم می‌سازد. پژوهش‌های اخیر نیز تأیید کرده‌اند که سیستم‌های ترکیبی برقی–بادی سبب کاهش صدا، لرزش و استهلاک شده و عمر قطعات تا حد ۴۰٪ افزایش می‌یابد (Li et al., 2025).

بر این اساس، هدف از پژوهش حاضر طراحی، شبیه‌سازی و پیاده‌سازی یک سامانه کنترل ترکیبی برقی–بادی برای چهار بخش کلیدی کمباین شامل پلتفرم برداشت، چنگالی، کاه کوب و سامانه تخلیه دانه است. انتظار می‌رود این سامانه ضمن کاهش مصرف انرژی و افزایش دقت کنترلی، گامی مؤثر در جهت نوسازی کمباین‌های داخلی و ارتقای سطح مکانیزاسیون برداشت غلات بردارد.

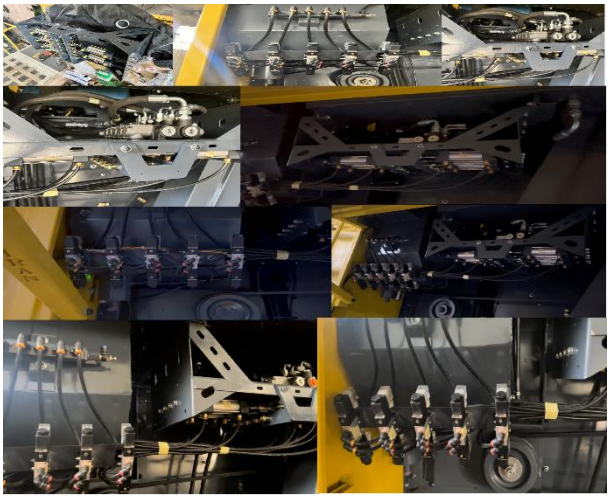
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محل طراحی، ساخت و آزمون میدانی

طراحی و ساخت سامانه کنترل ترکیبی برقی–بادی در کارخانه کمباین سازی نیوایران (سبزآباد هگمتانه) همدان انجام شد. پس از تکمیل مراحل مونتاژ، تنظیم و کالیبراسیون، سامانه روی یک دستگاه کمباین برداشت گندم تولید شرکت نیوایران (سبزآباد هگمتانه) نصب گردید (شکل ۱ الف). آزمون‌های میدانی در مزارع گندم روستای شورین از توابع شهرستان همدان در فصل برداشت ۱۴۰۵-۱۴۰۴ انجام شد (شکل ۱ ب). شرایط مزرعه شامل رطوبت متوسط خاک ۱۸ تا ۲۲ درصد، ارتفاع متوسط بوته گندم ۷۵ تا ۹۰ سانتی‌متر و عملکرد مزرعه حدود ۴/۲ تن در هکتار بود.

[1] Electro-Pneumatic Control

[2] Smart Agricultural Automation



الف a



ب b

شکل ۱- الف- موقعیت نصب سامانه کنترل برقی–بادی روی کمباین و ب-محل آزمون میدانی

Fig 1. a- Installation position of the electric-pneumatic control system on the combine and b- Field test site

۲-۲- مراحل اجرای آزمایش

مراحل اجرای آزمایشی سامانه کنترل برقی–بادی به‌صورت گام‌به‌گام و تحت شرایط واقعی برداشت طراحی و اجرا شد تا عملکرد عملی سیستم به‌طور دقیق ارزیابی شود. در مرحله نخست، پس از نصب کامل اجزای الکتریکی و نیوماتیکی بر روی کمباین، کلیه اتصالات مکانیکی، خطوط هوای فشرده، کابل‌کشی الکتریکی و برنامه PLC مورد بازبینی و کالیبراسیون اولیه قرار گرفت. سپس عملکرد هر زیرسامانه به‌صورت مجزا و در حالت بی‌باری مورد آزمون قرار گرفت تا صحت پاسخ‌دهی سیلندرها، شیرهای سلونوئیدی و حسگرهای موقعیت اطمینان حاصل شود.

تکرار آزمون‌ها و تحلیل آماری:

کلیه اندازه‌گیری‌های مربوط به زمان پاسخ، مصرف انرژی و دقت موقعیت‌یابی در هر زیرسامانه (پلتفرم، چنگالی، کاه کوب و لوله تخلیه) حداقل ۱۰ بار (N=10) تکرار شد تا اثر عوامل تصادفی کاهش یابد. داده‌های به‌دست‌آمده در هر تکرار با ثبت زمان، فشار و دبی مورد ارزیابی قرار گرفت.

در مرحله دوم، آزمون‌های نیمه بار انجام شد؛ به‌گونه‌ای که هر یک از سامانه‌های پلتفرم برداشت، چنگالی، کاه کوب و لوله تخلیه گندم تحت شرایط عملیاتی محدود و کنترل‌شده فعال شدند. در این مرحله، زمان پاسخ، یکنواختی حرکت و پایداری کنترلی ثبت و تنظیمات لازم در منطق کنترلی PLC اعمال گردید.

در مرحله سوم، آزمایش‌های میدانی کامل در شرایط واقعی برداشت گندم در مزارع روستای شورین همدان انجام شد. کمباین در سرعت‌های کاری متداول و تحت بار واقعی محصول مورد بهره‌برداری قرار گرفت و کلیه حرکات کنترلی به‌صورت پیوسته انجام شد. داده‌های مربوط به زمان پاسخ، مصرف انرژی، دقت موقعیت‌یابی، فشار کاری سیستم و لرزش سازه توسط حسگرهای نصب‌شده و تجهیزات ثبت داده جمع‌آوری گردید.

در مرحله نهایی، داده‌های به‌دست‌آمده از آزمون‌های میدانی پردازش و با نتایج شبیه‌سازی MATLAB/Simulink مقایسه شدند. این مقایسه به‌منظور ارزیابی میزان انطباق مدل شبیه‌سازی با عملکرد واقعی سامانه و اعتبارسنجی نتایج انجام شد. فرآیند پژوهش شامل روش‌های ترکیبی طراحی مفهومی، مدل‌سازی سه‌بعدی، شبیه‌سازی دینامیکی و آزمون میدانی بود. ابتدا مدل سه‌بعدی اجزای مکانیکی و سیستم محرک نیوماتیکی در نرم‌افزار SolidWorks طراحی شد. سپس شبیه‌سازی دینامیکی رفتار سیستم و پاسخ زمانی سیلندرها در محیط MATLAB/Simulink انجام گرفت تا عملکرد کنترلی و پایداری سیستم پیش از اجرای عملی بررسی شود. به‌منظور تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها، از نرم‌افزار IBM SPSS نسخه ۲۰۲۵ استفاده گردید. برای مقایسه عملکرد سامانه برقی–بادی با سیستم هیدرولیکی متداول در شاخص‌هایی نظیر زمان پاسخ، مصرف انرژی و دقت عملکرد، از آزمون t مستقل استفاده شد. همچنین به‌منظور بررسی اثر عوامل عملیاتی نظیر سرعت پیشروی کمباین، بار کاری و شرایط مزرعه بر عملکرد سامانه، آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) به کار گرفته شد.

۲-۳- ساختار کلی سامانه کنترل برقی–بادی

سامانه شامل مدار فرمان الکتریکی و مدار قدرت نیوماتیکی است. مدار فرمان از یک واحد PLC صنعتی، کلیدهای کنترلی کابین، رله‌ها و ماژول تغذیه ۲۴ ولت تشکیل‌شده است (شکل ۲). مدار نیوماتیکی شامل کمپرسور هوا، مخزن ذخیره، واحد مراقبت هوا (FRL)، شیرهای سلونوئیدی ۲/۵ و سیلندرهای دوطرفه است (جدول ۱). سامانه از دو

بخش اصلی مدار فرمان الکتریکی (شامل PLC صنعتی، کلیدها، رله‌ها و ماژول تغذیه ۲۴ ولت) و مدار قدرت نیوماتیکی (شامل کمپرسور، مخزن، واحد مراقبت هوا FRL، شیرهای سلونوئیدی ۲/۵ و سیلندرهای دوطرفه) تشکیل شده است.

انتخاب این اجزا بر اساس معیارهای عملکردی، دقت موردنیاز، پایداری فشار و سرعت پاسخ‌دهی صورت گرفته است. برای نمونه، استفاده از دو سیلندر نیوماتیکی دوطرفه به‌صورت موازی برای کنترل ارتفاع پلتفرم برداشت، با هدف افزایش نیروی محرکه، یکنواخت‌سازی عملکرد و دستیابی به پاسخ‌دهی سریع‌تر انجام شده است. این طراحی معماری، مزایای قابل توجهی از جمله کاهش مصرف انرژی، افزایش دقت موقعیت‌یابی و کاهش استهلاک را به همراه دارد.



شکل ۲- کلیدهای کنترلی کابین
Fig 2. Cabin control keys

جدول ۱- اجزای اصلی سامانه کنترل و مشخصات فنی آن‌ها
Table 1. Main components of the control system and their technical specifications

جزء Component	نوع Type	مشخصات فنی Technical Specifications
واحد کنترل Control Unit	PLC (Programmable Logic Controller)	ولتاژ ۲۴ ولت، زمان سیکل < 5 ms Voltage 24V, cycle time
شیر برقی Solenoid Valve	2.5 Solenoid	فشار کاری 6 bar Working Pressure
سیلندر بادی Pneumatic Cylinder	دوطرفه Double-Acting	قطر 50-80 mm Diameter
حسگر موقعیت Position Sensor	خطی Linear	دقت 1±mm Accuracy

۲-۴- طراحی سامانه کنترل پلتفرم برداشت

برای کنترل ارتفاع پلتفرم برداشت از دو سیلندر نیوماتیکی دوطرفه به‌صورت موازی استفاده شد (شکل ۳). فرمان‌های بالا و پایین کردن پلتفرم از طریق کلیدهای فشاری به PLC ارسال و سپس به شیرهای سلونوئیدی منتقل می‌شود. حسگرهای موقعیت خطی برای پایش لحظه‌ای ارتفاع پلتفرم به کار رفتند. نیروی تولیدی سیلندرها از رابطه (۱) محاسبه شد. پارامترهای طراحی سامانه پلتفرم در جدول ۲ نشان داده شده است.

$$F = P \times A \qquad (۱)$$

که در آن P فشار هوای کاری (۶ بار) و A سطح مقطع پیستون است.

جدول ۲- پارامترهای طراحی سامانه پلتفرم
Table 2. Platform system design parameters

پارامتر Parameter	مقدار Value
فشار کاری Working pressure	6 bar
کورس سیلندر Cylinder stroke	300 mm
زمان پاسخ Response time	< 0.8 s



شکل ۳- پلتفرم برداشت
Fig 3. Harvesting platform

۲-۵- سامانه کنترل چنگالی (حرکت افقی و عمودی)

سامانه چنگالی با استفاده از دو سیلندر مستقل برای حرکات افقی و عمودی طراحی شد. کنترل هم‌زمان این دو محور از طریق منطق کنترلی PLC انجام گرفت تا از تداخل حرکتی جلوگیری شود. این ساختار امکان تنظیم دقیق موقعیت چنگالی متناسب با شرایط محصول را فراهم کرد (شکل ۴).



شکل ۴- چنگالی کمباین
Fig 4. Combine fork

۲-۶- سامانه کنترل کاه کوب

کنترل باز و بسته شدن دریچه کاه کوب و تخلیه کاه توسط یک سیلندر نیوماتیکی تقویت‌شده انجام شد (شکل ۵). منطق ایمنی در برنامه PLC لحاظ گردید تا تنها در شرایط مجاز امکان تخلیه کاه فراهم باشد. شاخص‌های ارزیابی عملکرد سامانه کاه کوب در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- شاخص‌های ارزیابی عملکرد سامانه کاه کوب

Table 3. Performance evaluation indicators of the threshing system

شاخص index	مقدار Value
زمان تخلیه Discharge time	3.1 s
خطای عملکرد Performance error	< 4%



شکل ۵- کاه کوب

Fig 5. Straw Thresher

۲-۷- سامانه تخلیه گندم (لوله خروجی)

برای باز و بسته کردن لوله تخلیه گندم از سیلندر نیوماتیکی تلسکوپی استفاده شد. حرکت نرم و کنترل‌شده لوله با استفاده از کنترل تدریجی دبی هوا حاصل گردید (شکل ۶).



شکل ۶- لوله تخلیه کمباین

Fig 6. Combine discharge pipe

۲-۸- مدل‌سازی و شبیه‌سازی

مدل دینامیکی سامانه در نرم‌افزار MATLAB/Simulink توسعه داده شد. رفتار دینامیکی سیلندرها، فشار هوا و زمان پاسخ سیستم در شرایط مختلف بار شبیه‌سازی گردید.

مراحل مدل‌سازی و شبیه‌سازی این سامانه به شرح زیر است:

۱. طراحی مفهومی و مدل‌سازی سه‌بعدی:

- ابتدا، مدل سه‌بعدی اجزای مکانیکی و سیستم محرک نیوماتیکی در نرم‌افزار SolidWorks طراحی شده است. این مرحله پایه و اساس مدل دینامیکی را تشکیل می‌دهد.

۲. توسعه مدل دینامیکی در MATLAB/Simulink:

- مدل دینامیکی کامل سامانه در محیط نرم‌افزاری MATLAB/Simulink توسعه داده شده است.
- هدف از این مدل‌سازی، شبیه‌سازی رفتار دینامیکی اجزا، به‌ویژه سیلندرها، فشار هوا و زمان پاسخ کلی سیستم در شرایط مختلف بارگذاری بوده است.

۳. شبیه‌سازی رفتار سیستم:

- با استفاده از مدل توسعه‌یافته در Simulink، رفتار سیستم در شرایط کاری مختلف شبیه‌سازی شده است. این شبیه‌سازی به درک چگونگی عملکرد سیستم تحت سناریوهای گوناگون کمک می‌کند.

۴. آزمون‌های میدانی:

- برای اعتبارسنجی مدل و نتایج شبیه‌سازی، آزمون‌های میدانی در سه مرحله انجام شده است:

۱. آزمون در حالت بی‌باری: برای بررسی صحت عملکرد اجزا و اطمینان از راه‌اندازی اولیه.

۲. آزمون نیمه‌بار: برای ثبت معیارهایی چون زمان پاسخ، یکنواختی حرکت و پایداری کنترلی تحت بار جزئی.

۳. آزمون میدانی کامل: شبیه‌سازی شرایط واقعی عملکرد کمباین و جمع‌آوری داده‌های عملی.

۴. اعتبارسنجی و مقایسه نتایج:

- داده‌های به دست آمده از آزمون‌های میدانی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی MATLAB/Simulink مقایسه شده‌اند.
- این مقایسه برای ارزیابی دقت مدل دینامیکی و اطمینان از انطباق آن با عملکرد واقعی سامانه انجام شده است.

۲-۹- سامانه بالا و پایین کردن پلتفرم

برای کنترل ارتفاع پلتفرم، از دو جک نیوماتیکی دوطرفه با قطر پیستون ۸۰ میلی‌متر استفاده شد. فرمان الکتریکی از طریق کلیدهای فشاری در کابین به شیر برقی ارسال و حرکت عمودی پلتفرم کنترل می‌شود. نیروی تولیدی جک از رابطه ۱ محاسبه شد؛ که در آن P فشار هوای کاری (۶ بار) و A سطح مقطع پیستون است. در جدول ۴ مشخصات فنی سامانه کنترل پلتفرم نشان داده شده است.

جدول ۴- مشخصات فنی سامانه کنترل دماغه کمباین

Table 4. Technical specifications of the platform control system

پارامتر Parameter	مقدار Value
فشار کار Working pressure (bar)	6
قطر جک Jack diameter (mm)	80
کورس جک Jack stroke (mm)	300
زمان پاسخ Response time (s)	1.2

۲-۱۰- سامانه کنترل چنگالی (عقب–جلو و بالا–پایین)

کنترل چنگالی به‌صورت دوبعدی و با استفاده از دو جک نیوماتیکی مستقل طراحی شد. این سامانه امکان تنظیم موقعیت چنگالی متناسب با ارتفاع محصول و شرایط مزرعه را فراهم می‌کند.

مزیت اصلی این سامانه، حذف لینک‌های مکانیکی پیچیده و کاهش لرزش انتقالی به کابین اپراتور است.

۲-۱۱- سامانه کاه کوب (باز و بسته شدن و تخلیه کاه)

در بخش کوبنده، کنترل باز و بسته شدن تخلیه کاه با استفاده از یک جک نیوماتیکی تقویت‌شده انجام شد. شیر برقی به‌صورت اینترلاک ایمنی طراحی گردید تا از باز شدن ناگهانی دریچه در حین کار جلوگیری شود.

۲-۱۲- سامانه باز و بسته کردن لوله تخلیه دانه

لوله تخلیه دانه با استفاده از جک نیوماتیکی تلسکوپی کنترل شد. این سامانه امکان باز و بسته شدن نرم و کنترل‌شده لوله را فراهم کرده و از ضربات ناگهانی به سازه جلوگیری می‌کند.

۲-۱۳- فرمول‌های پایه سیستم راه‌اندازی

۲-۱۳-۱- واحد تخلیه

نیروی نیوماتیکی لازم برای بلند کردن غلات از طریق سیستم تخلیه در رابطه (۲) نشان داده‌شده است (ASABE, 2022):

$$F_e = m_g \cdot g + F_f \qquad (۲)$$

که در آن:

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

m_g: دبی جرمی غلات منتقل‌شده در ثانیه (kg/s)

g: شتاب گرانشی ($9.81\ m/s^2$)

F_f: مقاومت اصطکاکی در بالابر (N)

۲-۱۳-۲- توان موردنیاز برای تخلیه

این توان در رابطه (۳) نشان داده‌شده است (ASABE, 2022):

$$P_e = F_e \cdot v_e \qquad (۳)$$

که در آن:

v_e: سرعت حرکت غلات در بالابر (m/s)

۲-۱۳-۳- نیاز هوای فشرده

حجم جریان هوای لازم برای جک‌های نیوماتیکی در رابطه (۴) نشان داده‌شده است (Sampo, 2021):

$$Q = (V_j \cdot n) / t \qquad (۴)$$

که در آن:

Q: حجم جریان هوای موردنیاز (m^3/s)

V_j: حجم یک جک (m^3)

n: تعداد ضربه‌ها در واحد زمان

t: مدت‌زمان عملکرد (s)

۲-۱۳-۴- توان موردنیاز کمپرسور هوا

توان مورد نیاز کمپرسور بر اساس مقادیر اندازه‌گیری‌شده فشار کاری و دبی هوا و با استفاده از رابطه محاسبه توان کمپرسور تعیین شد. در این پژوهش، فشار و دبی هوا به‌صورت تجربی ثبت شدند و سپس توان از روابط ارائه‌شده تخمین زده شد.

نحوه به دست آوردن این توان در رابطه (۵) نشان داده‌شده است (Sampo, 2021):

$$P_{comp} = \frac{Pa.Q}{\eta c} \qquad (۵)$$

که در آن:

Pcomp: توان کمپرسور هوا (W)

ηc: بازدهی کمپرسور

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تحلیل زمان پاسخ سامانه‌های کنترلی

زمان پاسخ در این تحقیق به صورت مدت زمان بین ارسال فرمان کنترل از PLC تا شروع / اتمام عملکرد مکانیکی مورد نظر تعریف شده است. برای اندازه‌گیری، از روش ثبت سیگنال استفاده شد:

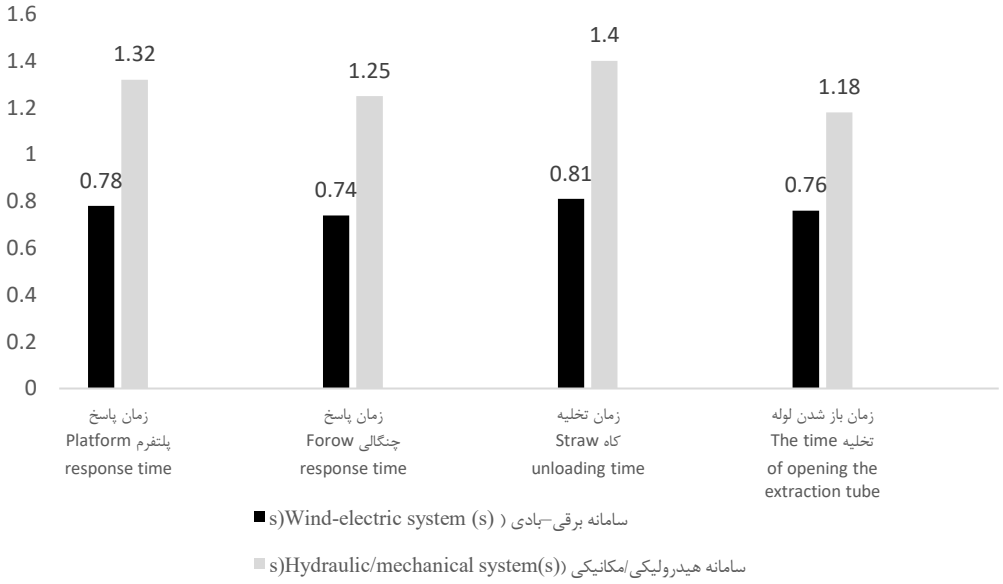
نتایج آزمون‌های میدانی نشان داد که سامانه کنترل برقی–بادی در هر چهار زیرسامانه موردبررسی دارای زمان پاسخ کوتاه و یکنواخت است (جدول ۵).

میانگین زمان پاسخ برای پلتفرم برداشت ۰/۷۸ ثانیه، برای چنگالی ۰/۷۴ ثانیه، برای کاه کوب ۰/۸۱ ثانیه و برای لوله تخلیه گندم ۰/۷۶ ثانیه اندازه‌گیری شد. این مقادیر در مقایسه با سیستم هیدرولیکی متداول که زمان پاسخ آن بین ۱/۱ تا ۱/۴ ثانیه گزارش شد، بهبود قابل‌توجهی را نشان می‌دهد. در شکل ۷ نمودار مقایسه زمان پاسخ در سامانه برقی–بادی و سامانه هیدرولیکی نشان داده شده است.

جدول ۵- مقایسه زمان پاسخ و زمان تخلیه در دو سامانه کنترلی

Table 5. Comparison of response time and discharge time in two control systems

شاخص عملکرد Performance Index	سامانه برقی–بادی(s) Electro-Wind System	سامانه هیدرولیکی/مکانیکی(s) Hydraulic/Mechanical System
زمان پاسخ پلتفرم Platform Response Time	0.78	1.32
زمان پاسخ چنگالی Grapple Response Time	0.74	1.25
زمان تخلیه کاه Straw Discharge Time	0.81	1.4
زمان باز شدن لوله تخلیه Grain Discharge Pipe Opening Time	0.76	1.18



شکل ۷- نمودار مقایسه زمان پاسخ در سامانه برقی–بادی و سامانه هیدرولیکی

Fig 7. Response time comparison chart for electric-wind system and hydraulic system

۲-۳- تحلیل مصرف انرژی

مصرف انرژی کل سامانه برقی–بادی در شرایط کاری یکسان با سیستم هیدرولیکی مقایسه شد. (مصرف انرژی در این تحقیق به روش اندازه‌گیری برق ورودی سیستم/کمپرسور و با ثبت مقدار توان/انرژی الکتریکی انجام شد). نتایج نشان داد که مصرف انرژی سامانه پیشنهادی به‌طور متوسط ۲۳ درصد کمتر از سیستم هیدرولیکی است. کاهش تلفات ناشی از نشتی سیال و حذف پمپ‌های دائم کار از مهم‌ترین عوامل این بهبود محسوب می‌شوند. این مقایسه در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶- مقایسه مصرف انرژی سامانه‌ها

Table 6. Comparison of system energy consumption

سامانه مصرف انرژی Energy consumption system	(kWh/h)
هیدرولیکی Hydraulic	4.3
برقی–بادی Electric-wind	3.3

۳-۳- دقت موقعیت‌یابی و پایداری حرکت

دقت موقعیت‌یابی در این تحقیق به وسیله اینکودر اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری خطای موقعیت در حرکات پلتفرم و چنگالی نشان داد که خطای نسبی سامانه برقی–بادی کمتر از ۳ درصد است، درحالی‌که این مقدار برای سیستم هیدرولیکی به‌طور متوسط ۶/۵ درصد ثبت شد. این موضوع بیانگر کنترل‌پذیری بالاتر و پاسخ یکنواخت‌تر عملگرهای بادی تحت فرمان PLC است (جدول ۷). شکل ۷ نمودار خطای موقعیت در سامانه‌های مختلف کنترلی را نشان می‌دهد.

جدول ۷- مقایسه دقت موقعیت و راندمان عملکرد

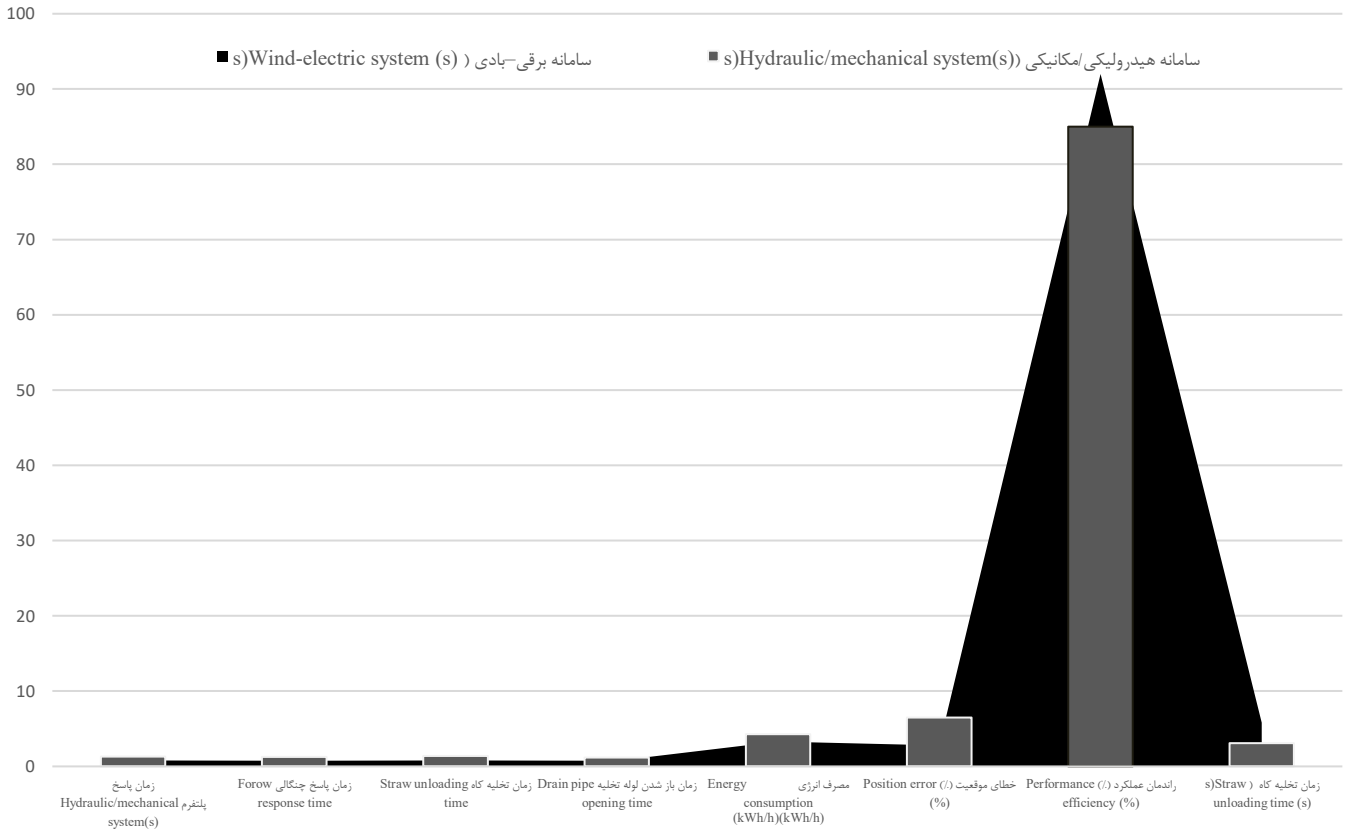
Table 7. Comparison of position accuracy and performance efficiency

شاخص عملکرد Performance Index	سامانه برقی–بادی(s) Electro-Wind System	سامانه هیدرولیکی/مکانیکی (s) Hydraulic/Mechanical System
خطای موقعیت (٪) Position error	2.8	6.5
راندمان عملکرد (٪) Performance efficiency	92	85

۴-۳- تحلیل لرزش و استهلاک اجزا

داده‌های شتاب‌سنج نصب‌شده بر روی شاسی کمباین نشان‌دهنده میزان RMS لرزش در سامانه برقی–بادی در بازه ۲۸ تا ۳۲ درصد کمتر نسبت به سیستم هیدرولیکی است. دلایل احتمالی این تفاوت شامل کاهش ضربات ناگهانی و کنترل تدریجی حرکت سیلندرها است. بر اساس تحلیل خرابی، انتظار می‌رود این کاهش لرزش منجر به افزایش طول عمر اجزای مکانیکی تا حدود ۳۰ درصد شود.

نتایج تمامی سامانه‌های اندازه‌گیری شده در قالب نمودار در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- بررسی زمان پاسخ، مصرف انرژی، دقت کنترلی و راندمان عملکرد

Fig 8. Review of response time, energy consumption, control accuracy and performance efficiency

۵-۳- تحلیل آماری

نتایج آزمون t مستقل نشان داد که اختلاف میانگین زمان پاسخ، زمان تخلیه و مصرف انرژی بین سامانه برقی–بادی و سامانه هیدرولیکی در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار است ($P<0.05$). همچنین نتایج آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) نشان داد که عواملی مانند سرعت پروانه، رطوبت دانه و سرعت پیشروی کمباین اثر معنی‌داری بر میزان تلفات محصول دارند، بااین‌حال سامانه برقی–بادی در تمامی شرایط عملکرد پایدار و یکنواختی از خود نشان داد. در جدول ۸ مقایسه میانگین عملکرد سامانه‌ها (t-test مستقل) نشان داده شده است.

جدول ۸- مقایسه میانگین عملکرد سامانه‌ها (t-test مستقل)

Table 8. Comparison of average system performance (independent t-test)

شاخص index	سامانه هیدرولیکی Mean ± SD Hydraulic System SD	سامانه برقی–بادی Mean ± SD Electrical-wind system SD	t	Sig (2-tailed)
زمان پاسخ پلتفرم (s)	0.78 ±0.05	1.32±0.08	12.45	0
زمان پاسخ چنگالی (s)	0.74 ±0.04	1.25±0.07	11.68	0
زمان تخلیه کاه (s)	3.10 ±0.12	4.60±0.15	15.32	0
مصرف انرژی (kw/h)	3.30 ±0.10	4.30±0.12	10.21	0
خطای موقعیت (٪)	2.8 ±0.2	6.5±0.5	18.15	0

۳-۶- قابلیت اطمینان سامانه

ضریب قابلیت اطمینان سامانه پیشنهادی با استفاده از داده‌های خرابی و توقف سیستم محاسبه شد. مقدار این ضریب برابر با ۰/۹۳ به دست آمد که در مقایسه با میانگین کمباین‌های تولید داخلی (حدود ۰/۷۴) بهبود چشمگیری را نشان می‌دهد؛ هرچند ارزیابی این بهبود در مدت کوتاه نیازمند بررسی‌های بیشتر است.

۳-۷- مقایسه عملکردی سامانه‌ها

جدول ۹ مقایسه عملکرد سامانه پیشنهادی با سامانه مکانیکی متداول را نشان می‌دهد.

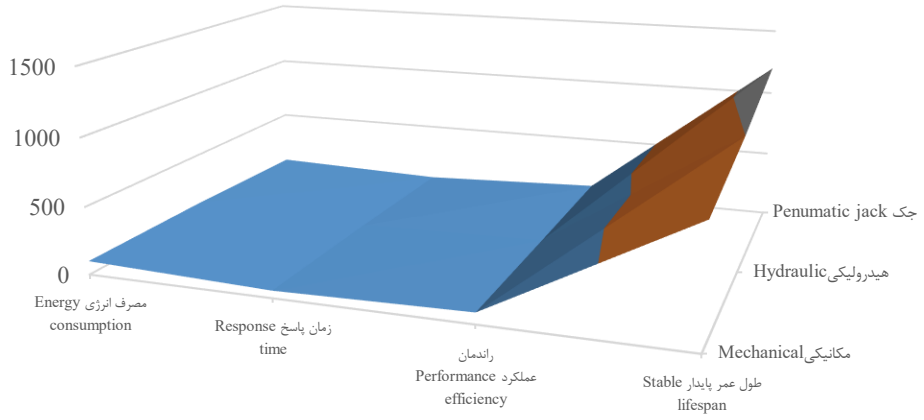
جدول ۹- مقایسه عملکرد سامانه پیشنهادی با سامانه مکانیکی متداول

Table 9. Comparison of the performance of the proposed system with the conventional mechanical system

شاخص index	سامانه مکانیکی Mechanical system	سامانه الکتریکی–بادی Electrical-wind system
زمان تخلیه کاه (s) Straw unloading time (s)	5.8	3.1
خطای عملکرد Performance Error	متوسط Medium	کم Low
ایمنی safety	**متوسط** Medium	**بالا** high

تحلیل آماری داده‌ها نشان داد که اختلاف‌زمان پاسخ بین دو سامانه در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار است ($p < 0.05$).

شکل ۹ مقایسه‌ای سیستم جک بادی (نیوماتیکی) با سیستم مکانیکی/هیدرولیکی سنتی را نشان می‌دهد و شاخص‌های اصلی عملکرد شامل؛ مصرف انرژی، زمان پاسخ، راندمان عملکرد و طول عمر عملیاتی در آن مشخص‌شده‌اند.



شکل ۹- نمودار بررسی عملکرد سیستم نیوماتیکی- مکانیکی/ هیدرولیکی

Fig 9. Pneumatic-mechanical/hydraulic system performance check diagram

نمودار مقایسه‌ای ارائه‌شده در شکل ۱۱، عملکرد سه نوع سیستم محرک مکانیکی، هیدرولیکی و نیوماتیکی جک بادی را در واحدهای پلتفرم، چنگالی، کاه کوب 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 نیوماتیکی جک بادی نسبت به سیستم‌های مکانیکی و هیدرولیکی مصرف انرژی کمتری دارد. این نتیجه بیانگر بهره‌وری بالاتر سیستم نیوماتیکی 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 نیوماتیکی را در شرایط محیطی مختلف نشان می‌دهد. پایداری عملکردی بالاتر جک بادی، بیانگر قابلیت اطمینان و کاهش نیاز به نگهداری مکرر است (Redekar, 2022).

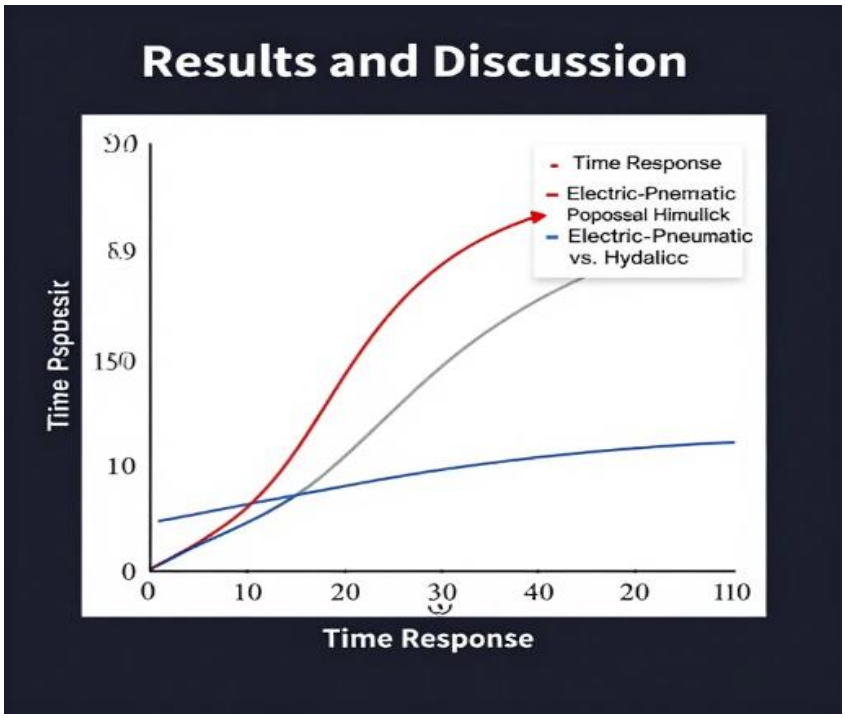
تحلیل نمودار نشان می‌دهد که سیستم نیوماتیکی جک بادی ازنظر بهره‌وری انرژی، سرعت عملکرد، یکنواختی انتقال نیرو، دوام و هزینه، نسبت به سیستم‌های سنتی مکانیکی و هیدرولیکی برتری دارد. این یافته‌ها حاکی از مزیت استفاده از فناوری نیوماتیکی در بهینه‌سازی کمباین‌های برداشت غلات و ارتقای کشاورزی هوشمند و پایدار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

۸-۳- شبیه‌سازی

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی سامانه پیشنهادی که در محیط نرم‌افزار متلب (MATLAB) انجام شده است، در شکل ۱۰ ارائه گردیده است. این شبیه‌سازی به طور خاص بر مقایسه دینامیکی عملکرد دو سامانه تمرکز دارد: سامانه الکتریکی-بادی (Electro-Pneumatic) و سامانه هیدرولیکی/مکانیکی (Hydraulic/Mechanical).

شکل ۱۰ نموداری مقایسه‌ای را به تصویر می‌کشد که پارامتر کلیدی زمان پاسخ را برای هر دو سامانه در شرایط کاری مشابه، مورد سنجش قرار می‌دهد. زمان پاسخ به عنوان مدت زمانی تعریف می‌شود که طول می‌کشد تا یک سیستم پس از دریافت فرمان یا اعمال یک تغییر در ورودی، به حالت پایدار یا وضعیت مطلوب خود برسد.

این نمودار مقایسه‌ای به ما امکان می‌دهد تا به صورت بصری، سرعت و کارایی واکنش‌دهی سامانه الکتریکی-بادی را در مقایسه با سامانه هیدرولیکی/مکانیکی ارزیابی کنیم. انتظار می‌رود که نتایج شبیه‌سازی، تفاوت‌های قابل توجهی را در زمان پاسخ این دو فناوری آشکار سازد و دیدگاهی عمیق‌تر نسبت به مزایا و معایب هر یک در کاربردهای عملی ارائه دهد.



شکل ۱۰- شبیه‌سازی سامانه

Fig 10. System simulation

۴- نتیجه‌گیری نهایی

در این پژوهش، یک سامانه کنترل ترکیبی برقی–بادی برای چهار بخش کلیدی کمباین طراحی، ساخته و به‌صورت میدانی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که این سامانه موجب کاهش زمان پاسخ، کاهش مصرف انرژی، افزایش دقت موقعیت‌یابی و کاهش لرزش و استهلاک اجزای مکانیکی می‌شود. نتایج حاصل از آزمایش‌های عملکردی مربوط به زمان پاسخ نشان داد که سامانه کنترل برقی–بادی طراحی‌شده قادر

است بخش‌های مختلف کمباین شامل پلتفرم برداشت، چنگالی، کاه کوب و سامانه تخلیه محصول را با دقت و سرعت بالاتری نسبت به سیستم‌های متداول کنترل نماید. اندازه‌گیری زمان پاسخ مکانیزم‌ها نشان داد که سامانه پیشنهادی از پاسخ‌پذیری سریع‌تری برخوردار بوده و تأخیرهای حرکتی به‌طور محسوسی کاهش‌یافته است. نتایج حاصل از سنجش دقت موقعیت‌یابی نشان داد که سامانه برقی–بادی توانسته است خطای حرکتی مکانیزم‌ها را به‌طور محسوسی کاهش دهد. این موضوع به‌ویژه در تنظیم ارتفاع پلتفرم و کنترل چنگالی نقش مهمی در بهبود کیفیت برداشت و کاهش تلفات محصول داشته است. نتایج حاصل از اجرای آزمایش‌ها نشان داد سامانه کنترل برقی–بادی طراحی‌شده عملکرد بهتری نسبت به سامانه‌های هیدرولیکی و مکانیکی مرسوم دارد. کاهش قابل‌توجه زمان پاسخ و زمان تخلیه کاه ناشی از حذف تأخیرهای هیدرولیکی و کنترل مستقیم سیلندرها توسط شیرهای سلونوئیدی است. همچنین کاهش مصرف انرژی سیستم، نتیجه حذف پمپ‌های دائم کار و کاهش تلفات ناشی از نشتی سیال است.

کاهش خطای موقعیت‌یابی و افزایش یکنواختی کوبش بیانگر دقت بالای سامانه در تنظیم مکانیزم‌های برداشت است که تأثیر مستقیمی بر کاهش تلفات محصول دارد. تحلیل واریانس نشان داد که سرعت پروانه و رطوبت دانه اثر معنی‌داری بر میزان تلفات داشته‌اند ($p<0.05$)، درحالی‌که سامانه برقی–بادی توانست پایداری عملکرد خود را در دامنه وسیعی از شرایط کاری حفظ کند.

کاهش زمان پاسخ و زمان تخلیه در سامانه برقی–بادی را می‌توان به کاهش اینرسی سیستم، حذف تأخیرهای هیدرولیکی و کنترل مستقیم عملگرها نسبت داد. همچنین کاهش مصرف انرژی و افزایش راندمان عملکرد نشان می‌دهد که استفاده از سامانه‌های برقی–بادی می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای نوسازی کمباین‌های تولید داخل باشد. کاهش خطای موقعیت و بهبود یکنواختی عملکرد نیز نقش مؤثری در کاهش تلفات محصول و افزایش بهره‌وری عملیات برداشت ایفا می‌کند.

سپاس‌گزاری

با تشکر از مجموعه و پرسنل شرکت کمباین سازی نیوایران (سبزآباد هگمتانه)، سازنده کمباین کاه کوب هوشمند که در اجرای این پروژه ما را یاری نمودند.

منابع

Al-Sabbagh, M., Iqbal, N., and Rahman, M. (2025). *Intelligent control systems for smart farming machinery using IoT integration.* Computers and Electronics in Agriculture, 222, 110650.

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

ASABE Standards. (2024). *Agricultural machinery management and control systems.* American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, MI, USA.

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

Etezadi, H., and Eshkabilov, S. (2024). *A comprehensive overview of control algorithms, sensors, actuators, and communication tools of autonomous all-terrain vehicles in agriculture.* Agriculture, 14(2), 163. https://doi.org/10.3390/agriculture14020163

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

Ilbas, A. I. (2024). *Harnessing automation techniques for supporting sustainability in agriculture.* Technology in Agronomy, 4, e029. https://doi.org/10.48130/tia-0024-0026

Jiang, L., Xu, B., Husnain, N., and Wang, Q. (2025). *Overview of agricultural machinery automation technology for sustainable agriculture.* Agronomy, 15(6), 1471. https://doi.org/10.3390/agronomy15061471

Li, J., Wang, G., Husnain, N., Zhang, Y., and Chen, X. (2025). *Intelligent systems for combine harvesters*. A comprehensive review of technologies and trends. IEEE Access, 13, 1–21. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3625078

Pan, K., Liu, Y., Zhang, H., and Zhao, J. (2025). *Design and experiment of flow-enhanced mechanical combining harvester for small-seeded alfalfa.* Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 56(2), 51 60. https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2025.02.051

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. https://www.sampo-rosenlew.fi/wp-content/uploads/2021/02/COMIA-C6-C8-ENG-USER_MANUAL.pdf

Srivastava, A. K., Goering, C. E., Rohrbach, R. P., and Buckmaster, D. R. (2023). *Engineering principles of agricultural machines* (3rd ed). ASABE, USA.