

ساخت و ارزیابی یک موزع خودکار برای ردیف‌کار کشت نخود و برآورد مدل‌های رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی

واحد ابراهیمی^۱، پیمان سلامی^{۲*} و هادی صمیمی اخیحجانی^۳

چکیده

بیشتر دستگاه‌های کاشت که امروزه در ایران استفاده می‌شوند یا از دقت کاشت کافی برخوردار نیستند و یا به خاطر داشتن سامانه‌های پیچیده، احتیاج به سرمایه‌گذاری اولیه زیادی برای کشاورزان دارند. این ادوات با قیمت بالا ارائه شده و برای مزارع کوچک که عملکرد پایینی دارند، مناسب نیستند. در ایران روش کاشت نخود بیشتر به صورت دستی انجام می‌شود که مستلزم صرف وقت و هزینه زیادی است. بدیهی است بهره‌مندی از کارنده‌هایی نظیر ردیف‌کار باعث صرفه‌جویی در هزینه‌ها و کاهش مدت زمان کاشت خواهد شد. در این پژوهش، یک سامانه موزع خودکار ردیف‌کار ماشین کاشت نخود ساخته شده و مورد ارزیابی قرار گرفت و سامانه‌ای برای کارنده در نظر گرفته شد که به صورت خودکار جهت کاشت یکنواخت بذر نخود با تکیه بر جریان یکنواخت بذر نخود عمل کشت را انجام دهد. به این منظور برای بررسی یکنواختی و دقت در کاشت نخود از شاخص‌های نکاشت، چند کاشت، کیفیت تغذیه و دقت در فاصله کاشت استفاده شد. متغیرهای سرعت حرکت تراکتور در سه سطح ۳، ۵ و ۷ کیلومتر بر ساعت و فاصله بین بذرهای در سه سطح ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر برای ارزیابی سامانه مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد تأثیر متغیر سرعت بر روی تمامی شاخص‌ها در سطح یک درصد معنی‌دار بود. همچنین تأثیر متغیر فاصله بین بذرهای نیز بر روی شاخص‌های چند کاشت، کیفیت تغذیه و دقت در فاصله کاشت نیز در سطح یک درصد معنی‌دار بود، لیکن اثر معنی‌داری بر روی شاخص نکاشت نداشت. در هیچ‌کدام از شاخص‌ها، متغیرهای سرعت و فاصله بین بذرهای اثر متقابل نداشتند. برای بررسی رابطه بین متغیرهای ثابت سرعت و فاصله بین بذرهای عملکردی موزع از رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی استفاده شد. این مدل رگرسیونی توانست با ضریب تبیین بالایی رابطه بین متغیرها را برازش کند. با توجه به شاخص‌های اندازه‌گیری شده، یکنواختی و دقت در کاشت نخود با این موزع خودکار مطلوب بود.

واژه‌های کلیدی: فاصله کاشت، چند کاشت، کیفیت تغذیه، رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی، موزع خودکار، نخود.

ارجاع: ابراهیمی و. سلامی پ. و صمیمی اخیحجانی ه. ۱۴۰۲. ساخت و ارزیابی یک موزع خودکار برای ردیف‌کار کشت نخود و برآورد مدل‌های رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۸: ۱-۱۰. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2023.14009.607>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان، سنندج.

۲- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان، سنندج.

۳- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان، سنندج.

* نویسنده مسئول: p.salami@uok.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۷

مقدمه

در عصر حاضر با افزایش جمعیت جهان تقاضا برای مواد غذایی روند افزایشی دارد که این خود سبب سرعت بخشیدن به خلق روش‌های نوین تولید محصول و مکانیزه کردن ادوات کشاورزی شده است. متخصصین همواره مکانیزه کردن را با دو هدف ارتقا ماشین‌های کشاورزی و افزایش دقت عمل جلو می‌برند. فعالیت‌ها به منظور تحقق اهداف نامبرده در زمینه عملیات کاشت منجر به پیاده‌سازی و توسعه بذرکارهایی با دقت بالا با حداقل خطا شد (Datta, 1974).

توان مورد نیاز جهت دوران محور سامانه اندازه‌گیر بذر (موزع)، در ماشین‌های کاشت مرسوم نظیر ردیف‌کارها، از طریق چرخ زمین‌گرد تأمین می‌گردد. در برخی موارد زمین‌هایی که برای کاشت مهیا می‌گردند، دارای رطوبت یا چسبندگی خاک بالا هستند و حتی ممکن است زمین زراعی از درصد بقایای گیاهی زیادی برخوردار باشد. ماشین‌های کاشت به ویژه ردیف‌کارها، در موارد ذکر شده کارایی خود را از دست داده و در دقت کاشت و قرارگیری بذر در موقعیت صحیح خود به شدت دچار افت می‌گردند (Griffith *et al.*, 1988). این عوامل در کنار یکدیگر موجب جلوگیری از درگیری صحیح چرخ با زمین شده که در نهایت موجب ایجاد اختلال در یکنواختی کاشت بذر خواهد شد. با توجه به نتایج به دست آمده از پژوهش‌های پیشین (Anantachar *et al.*, 2010)، غیریکنواختی کاشت بذر به کاهش عملکرد محصول ختم می‌گردد. غیریکنواخت بودن فاصله بذرها از دو جنبه می‌تواند باعث افت عملکرد شود. از یک سو اگر فاصله یک دانه بذر نسبت به بذره‌های اطراف خود زیاد باشد، باعث هدر رفتن سطح زیر کشت شده و از سوی دیگر در صورتی که فاصله بذرها از محدوده استاندارد خود کمتر باشد، بذر دچار مشکل در تأمین مواد غذایی و عناصر مورد نیاز به ویژه در خاک‌های فقیر خواهد شد. علاوه بر این، وجود مشکلات فوق در ردیف‌کارها به کاهش ترغیب کشاورزان جهت استفاده از روش‌های مکانیزه و نوین کاشت منتهی می‌گردد (Anantachar *et al.*, 2010).

رعایت فواصل بذرها در حد معقول و استاندارد به دلیل عدم وجود رقابت بین بوته‌ها و ممانعت از هدر دادن فضای مزرعه علاوه بر افزایش عملکرد محصول، موجب استفاده استاندارد از نهاده‌هایی چون بذر، کود و سموم مبارزه با

آفات و باعث بهبود عملیات داشت و برداشت از لحاظ کیفیت و زمان خواهد شد. بذرهایی که با ردیف‌کار کاشته می‌شوند، به غیر از این که باید دارای فاصله معین و دقیقی نسبت به ردیف مجاور خود باشند؛ باید دارای فاصله دانه بذر معین نسبت به بذرهایی که روی همان ردیف قرار گرفته‌اند، باشند. با توجه به این که هیچ‌گونه سازوکاری برای اندازه‌گیری جریان بذرها وجود ندارد، نرخ پراکنش بذر در سطح مزرعه قابل تشخیص نیست (Al-Mallahi & Kataoka, 2013). سرعت پیشروی ماشین از جمله عامل‌هایی است که افزایش نرخ آن موجب اختلال و به هم خوردن فواصل بین بذرها روی ردیف می‌شود (Panning *et al.*, 2000). بنابراین با وجود اینکه مقدار نرخ کاشت یا به اصطلاح آهنگ مصرف بذر در هکتار توسط راننده تنظیم می‌شود، اما نرخ کاشت بنا به دلایلی از قبیل تغییر عملکرد موزع در سرعت‌های مختلف تغییرپذیر است (Quanawi *et al.*, 2017). علاوه بر این، عدم عملکرد مناسب وضعیت جریان بذر در ردیف‌کارها، باعث بروز مشکلاتی نظیر افت عملکرد موزع، مسدود شدن لوله‌های سقوط و خالی شدن مخزن بذر شده و نتیجه این ضعف باعث بروز یکنواختی کشت در وسعت زیاد می‌گردد. بذرکاری که قابلیت اندازه‌گیری دانه‌های بذر را به صورت زمان واقعی داشته باشد، کارنده دقیق می‌نامند (Yazgi & Degirmencioglu, 2007). با توجه به اینکه فرآیند عمل کاشت در ردیف‌کارها دارای یک وضعیت حلقه بسته است، ممکن است در حین عملیات یکی از مجراهای خروج بذر دچار گرفتگی شود. ردیف مربوط به مجرای مسدود شده بدون بذر باقی مانده و کشاورز تا موقع سبز شدن گیاه متوجه این مشکل نخواهد شد. لذا با وجود چنین اشکالاتی، کشاورز هزینه‌های مالی بالایی را متحمل می‌گردد. پایش عملکرد ردیف‌کار با هدف بذرکاری دقیق مطابق مقدار توصیه شده و اطمینان از عملکرد صحیح ردیف‌کار با نصب حسگرهایی در قسمت خروجی موزع یا لوله سقوط امکان‌پذیر است. این امر باعث می‌شود تا مقدار دبی جرمی بذر را برخط و به صورت بلادرنگ اندازه‌گیری نمود. مانع مهمی که در تعبیه حسگرهای دبی‌سنج جرمی مواد دانه‌ای وجود دارد، محدودیت فضا است. وجود حسگر سنجش دبی جرمی دانه غالباً در مسیر عبور مواد قرار گرفته که می‌تواند دلیل انحراف ناچیز موقعیت جاگذاری بذر باشد. این امر باعث کاهش بازده سامانه اندازه‌گیر دبی

مواد و روش‌ها

قسمت‌های اصلی سامانه کارنده

این پژوهش با کمک یک ردیف‌کار پنوماتیک با موزع صفحه‌ای انجام شد. ردیف‌کار مورد مطالعه ساخت شرکت «تراشکده، ایران» بود. به‌منظور کاهش گشتاورهای مکانیکی موجود روی محور چرخ این ردیف‌کار، سیستم انتقال توان مکانیکی قدیمی (از چرخ به موزع) به‌طور کامل حذف شد. به‌جای این سامانه، از یک سامانه الکتریکی جایگزین استفاده شد که هدف از آن توسعه، پیاده‌سازی و ارزیابی سامانه‌ای بود که بتواند در عین افزایش دقت در کاشت، سهولت کار در مزرعه و کاهش هزینه‌های اولیه را به‌همراه داشته باشد. به‌طور کلی در این سامانه، سرعت حرکت دستگاه توسط یک سامانه الکترونیکی اندازه‌گیری شد. این سرعت پس از پردازش توسط ریزکنترل کننده، به‌صورت مدوله سازی عرض پالس (PWM)^۳ برای کنترل دور موتور راه‌انداز موزع فرستاده می‌شود.

با توجه به اینکه کارنده مورد بررسی از نوع ردیف‌کار پنوماتیک بود، برای اعمال نیروی مکش به سامانه موزع، یک دمنده هوا با نام تجاری Crown ساخت کشور سوئیس با دبی جریان هوای $4-0 \text{ m}^3/\text{min}$ به‌کار گرفته شد. صفحه موزع استفاده شده ساخت شرکت تراشکده دارای ۲۶ روزنه دایره‌ای با قطر ۵ میلی‌متر بود. وظیفه اصلی موزع، قراردادی بذر با کمترین صدمه ممکن در درون لوله سقوط حاوی جریان هوا است.

به منظور تأمین نیروی محرک برای چرخش صفحه موزع بذر و در غیاب چرخ زمین‌گرد، از یک موتور ۱۲ ولت جریان مستقیم (که از باتری تراکتور تغذیه می‌شد) استفاده شد.

برای دریافت اطلاعات حرکت و ارسال پالس‌های مناسب به موتور از برد آردوینو Uno استفاده شد. این برد در واقع مغز اصلی سامانه است و کلیه ورودی و خروجی‌ها به سیستم را تحت کنترل دارد. به منظور اندازه‌گیری سرعت حرکت رو به جلو، از یک رمزکننده مدل LPD3806-360BM-G5-24C و برای تشخیص دانه‌های عبوری در لوله سقوط از حسگر مادون قرمز E18-D80NK استفاده شد. لازم به ذکر است برای عدم تأثیرگذاری گرد و غبار بر حسگر، سعی شد بذرهای استفاده شده عاری از هر نوع مواد زاید باشند. همچنین حسگر از زمین با فاصله نصب

جرمی در ردیف‌کار می‌شود (Bahrami & Kiani, 2016). در یک پژوهش اثرات سرعت پیشروی واقعی در دو سطح و مکش در سه سطح برای دو بذر هندوانه و خیار به منظور تعیین سرعت پیشروی و فشار بهینه بذرکار به کمک ابزار دقیق و فناوری پردازش تصویر مورد بررسی قرار گرفت. این پژوهش در دو شرایط آزمایشگاهی و مزرعه‌ای با دو نوع بذر هندوانه و خیار به صورت آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. اثر سرعت پیشروی و مکش با استفاده از شاخص‌های نکاشت، چندانگانه، خطا (ضریب تغییرات) و بالاترین شاخص کیفیت تغذیه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که دو عامل سرعت و مکش در ارتباط با هم و غیرمساوی روی یکنواختی فاصله کشت تأثیر داشتند (Abdullahzare et al., 2016).

رگرسیون چندجمله‌ای تکاملی (EPR) یک الگوریتم ژنتیک^۱ (GA) ساده را برای جستجو در فضای ساختار مدل به‌کار می‌برد. رگرسیون چندجمله‌ای تکاملی در مرحله اول به‌وسیله الگوریتم ژنتیک به‌دنبال ساختار نمادین می‌گردد و مقادیر ثابت را در مرحله دوم به‌وسیله پیدا نمودن کوچکترین مربعات^۲ (LS) مسائل خطی محاسبه می‌کند، بنابراین رابطه‌ای دوجانبه بین یک ساختار و پارامترهای آن شبیه‌سازی می‌کند.

با توجه به تحقیقات پیشین در مورد ارزیابی خروجی بذر کشت شده در مزرعه تا کنون تحقیق جامع در مورد موزع خودکار برای ماشین کاشت نخود با توجه به مشکلات موزع‌های مرسوم ساخته و مورد ارزیابی آزمون‌های عملکردی قرار نگرفته بود. هدف از پژوهش کنونی، طراحی و پیاده‌سازی یک سامانه خودکار جهت کاشت یکنواخت بذر نخود، کاهش گشتاور مورد نیاز جهت چرخش موزع، عدم وابستگی به چرخ زمین‌گرد و اندازه‌گیری جریان بذر نخود در ردیف‌کار است. همچنین از مدل‌های رگرسیونی برای ارتباط بین عوامل تأثیرگذار بر کارایی سامانه استفاده گردید.

1- Genetic Algorithm

2- Least Squares

3- Pulse Width Modulation

برابر فاصله کاشت تنظیم شده هستند (Kachman & Smith, 1995). در واقع می‌توان گفت شاخص کیفیت تغذیه برابر است با ۱۰۰ منهای مجموع دو شاخص نکاشت و چند کاشت.

$$I_{fq} = 100 - (I_{miss} + I_{mult}) \quad (3)$$

دقت در فاصله کاشت: این شاخص عبارت است از اندازه‌گیری تغییرات در فاصله کاشت مطلوب یا تنظیم شده بین بذرهای پس از در نظر گرفتن تغییرات ناشی از نکاشت‌ها و چندکاشت‌ها که از تقسیم انحراف استاندارد فاصله بیش‌تر از نصف و کم‌تر از ۱/۵ برابر فاصله کاشت مطلوب بر فاصله کاشت مطلوب یا تنظیم شده بر حسب میلی‌متر به دست می‌آید. به بیان دیگر دقت در فاصله کاشت عبارت است از اندازه‌گیری تغییرات در فاصله کاشت مطلوب یا تنظیم شده بین بذرهای پس از در نظر گرفتن تغییرات ناشی از نکاشت‌ها و چندکاشت‌ها (Kachman & Smith, 1995).

$$I_p = \frac{S_d}{S} \quad (4)$$

در معادله (۴)، S فاصله کاشت مطلوب یا تنظیم شده بر حسب میلی‌متر و S_d انحراف استاندارد فاصله بیش‌تر از نصف و کم‌تر از ۱/۵ برابر فاصله کاشت مطلوب است.

اندازه‌گیری خواص فیزیکی بذر

با توجه به این که دستگاه کارنده مورد آزمایش در این پژوهش ردیف‌کار بود، از بذر نخود رقم کابلی که به‌وسیله این ماشین‌ها در مزرعه کشت می‌شوند برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد.

دانه‌های تهیه شده قبل از انجام آزمایش به‌طور کامل تمیز و مواد خارجی و دانه‌های آسیب دیده از آن‌ها جدا شد. سپس بذرهای را در یک خشک‌کن آزمایشگاهی (آون) در دمای 100 ± 1 درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت، طبق استاندارد وزنی (ASAE (1994) به شماره S352.3) قرار داده شده و رطوبت اولیه آن بر اساس معادله (۵) بر پایه خشک تعیین شد. با استفاده از کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر، اندازه‌گیری‌های ابعادی شامل (طول، عرض، ضخامت) برای ۵۰ دانه به‌طور تصادفی که از کل نمونه‌ها انتخاب شده بودند انجام شد.

قطر متوسط حسابی، قطر متوسط هندسی، کرویت، زاویه پایداری، جرم حجمی ظاهری و جرم حجمی واقعی مطابق با معادلات (۶) تا (۱۱) برای آن‌ها محاسبه شد

شد تا اثر گرد و غبار کاهش محسوسی داشته باشد. حسگر به گونه‌ای نصب گردید که بذرهای نخود از جلوی آن رد شده و صحت تشخیص بذرها کنترل شود. در شکل ۱ نمایی کلی از قسمت‌های اصلی سامانه کارنده نشان داده شده است.



شکل ۱- نمایی کلی از قسمت‌های اصلی سامانه کارنده، ۱- شاسی، ۲- مخزن بذر، ۳- اهرم تثبیت عمق، ۴- شیار بازکن، ۵- چرخ حمل، ۶- پوشاننده، ۷- فشاردهنده، ۸- موزع، ۹- الکتروموتور DC، ۱۰- مدار فرمان

ویژگی‌های عملکردی کارنده پنوماتیک

ارزیابی عملکرد و یکنواختی کاشت در کارنده‌های کشاورزی به وسیله شاخص‌هایی انجام می‌شود که این شاخص‌ها عبارت‌اند از:

شاخص نکاشت: مطابق معادله (۱) عبارت است از درصد فاصله‌هایی که بزرگ‌تر از ۱/۵ برابر فاصله کاشت تنظیم شده و بر حسب میلی‌متر هستند (Kachman & Smith, 1995).

در این معادله n_1 تعداد فاصله‌های بزرگ‌تر از ۱/۵ برابر فاصله کاشت تنظیم شده و N، تعداد کل فاصله‌های اندازه‌گیری شده است.

شاخص چند کاشت: بنابر معادله (۲) عبارت است از درصد فاصله‌های کم‌تر یا برابر با نصف فاصله کاشت تنظیم شده (Kachman & Smith, 1995).

$$I_{mult} = \frac{n_2}{N} \quad (2)$$

در این معادله n_2 تعداد فاصله‌های کوچک‌تر یا مساوی نصف فاصله کاشت تنظیم شده است.

شاخص کیفیت تغذیه: با توجه به معادله (۳)، عبارت است از درصد فاصله‌هایی که بیش‌تر از نصف و کم‌تر از ۱/۵

ریخته شد و بذرها درون تولوئن غوطه‌ور شدند (حجم نمونه‌های اضافه شده ۱۰ و دقت وسیله اندازه‌گیری ۱ میلی‌لیتر بود). جرم حجمی واقعی (V_a) نسبت جرم نمونه (M) به حجم خالص آن (V) تعریف می‌شود. جرم حجمی واقعی از تقسیم وزن نمونه به حجم تولوئن جابه‌جا شده به وسیله نمونه محاسبه گردید. جدول ۱ خواص فیزیکی بذر نخود را نشان می‌دهد.

رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی^۱ (EPR)

یکی از روش‌های جدید برای توسعه روابط بین متغیرهای ورودی و خروجی، رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی است. EPR می‌تواند با مفهوم‌سازی پدیده‌های فیزیکی یا ساده‌سازی معادلات دیفرانسیل ساختار ریاضی را استخراج نموده و پدیده‌های مشخص شده را توصیف کند. در این روش با در نظر گرفتن معادلات، فرآیند مدل‌سازی آغاز می‌شود. لازم به ذکر است که با افزایش تعداد متغیرها، به تدریج پارامترهای مختلف کمک کننده برای ساخت معادلات بیان‌کننده رابطه اصلی انتخاب می‌شود. رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی شامل توابع مختلف بهینه‌سازی نیز هست و مجموعه‌ای از طرح‌های چند بعدی را بر اساس تحلیل پیچیدگی گسترده ارائه می‌کند (Giustolisi & Savic, 2006). رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی نه تنها می‌تواند در یک مورد به صورت واحد عمل کند، بلکه می‌تواند به عنوان یک مدل چند هدفه نیز در فرآیندهای مختلف عمل کند. بنابراین یک تابع هدف برای کنترل برازش مدل‌ها بدون اعمال شرایط پیچیده برای مدل‌ها در EPR تک‌هدفه اعمال می‌شود. دو یا سه تابع هدف ارائه شده‌اند و حداقل یک تابع هدف پیچیدگی مدل‌ها را در پیکربندی چند هدفه کنترل می‌کند. در این حالت دو نوع تابع ساده و پیچیده می‌تواند ساخته شود. در این تحقیق برای ارتباط بین پارامترهای تأثیرگذار بر شاخص نکاشت، چند کاشت، کیفیت تغذیه و دقت در فاصله کاشت، از EPR استفاده شده است. برای محاسبات از نرم‌افزار EPR_SA_ver02 استفاده شد.

شرایط مزرعه

مزرعه مورد نظر در شهرستان سنندج و در منطقه دوشان (۵ کیلومتری سنندج) و ایستگاه تحقیقات کشاورزی

Balasubramanian, 2001; Dursun & Dursun, 2005;) Ghasemi *et al.*, 2008; Kabas *et al.*, 2007; Mohsenin, 1986).

$$M_d = \frac{w_w}{w_d} \times 100 \quad (5)$$

$$D_a = \frac{L+W+T}{3} \quad (6)$$

$$D_g = (LWT)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

$$\phi = \frac{(LWT)^{1/3}}{L} \quad (8)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{h}{a} \quad (9)$$

$$\rho_b = \frac{M}{V_b} \quad (10)$$

$$\rho_a = \frac{M}{V_a} \quad (11)$$

که در این معادلات:

M_d : رطوبت بر پایه خشک بر حسب درصد

W_w : وزن آب موجود در محصول بر حسب گرم

W_d : وزن ماده خشک بر حسب گرم

L : طول دانه بر حسب میلی‌متر

W : عرض دانه بر حسب میلی‌متر

T : ضخامت دانه بر حسب میلی‌متر

D_a : قطر متوسط حسابی بر حسب میلی‌متر

D_g : قطر متوسط هندسی بر حسب میلی‌متر

ϕ : کرویت

ρ_b : جرم حجمی بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب

V_b : حجم استوانه بر حسب میلی‌لیتر

M : جرم مواد دانه‌ای بر حسب گرم

ρ_a : جرم حجمی واقعی بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب

V_a : حجم مواد دانه‌ای بر حسب میلی‌لیتر

θ : زاویه پایداری بر حسب درجه

h : ارتفاع کپه بر حسب میلی‌متر

a : قاعده محصول پهن شده روی سطح، بر حسب میلی‌متر است.

همچنین جهت تعیین وزن هزار دانه از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم استفاده شد.

برای محاسبه جرم حجمی طبق معادله (۱۰) یک استوانه مدرج را با حجم مشخص پر از نمونه کرده، از تقسیم جرم توده بر حجم توده، میزان جرم حجمی توده به دست آمد.

برای تعیین جرم حجمی واقعی از روش جابه‌جایی سیال (معادله (۱۱)) استفاده شد (Balasubramanian, 2001; Dursun & Dursun, 2005; Ghasemi *et al.*, 2008; Kabas *et al.*, 2007; Mohsenin, 1986).

به همین منظور مقدار ۲۵۰ میلی‌لیتر سیال تولوئن در یک استوانه مدرج

لیکن اثر فاصله بین بذرها و اثر متقابل این دو متغیر معنی‌دار نبود.

در جدول‌های ۳ و ۴ به ترتیب نتایج مقایسه میانگین دانکن اثر متغیرهای سرعت پیشروی و فاصله بین بذرها در سطح یک درصد آورده شده است. با توجه به معنی‌دار نشدن متغیر فاصله بین بذرها، نیاز چندانی به نتایج مقایسه میانگین دانکن وجود ندارد. کمترین شاخص نکاشت مربوط به سرعت ۳ کیلومتر بر ساعت و بیشترین شاخص نکاشت مربوط به سرعت ۷ کیلومتر بر ساعت بود. همان‌طور که مشخص است، با افزایش سرعت، میزان شاخص نکاشت افزایش می‌یابد. این نتیجه منطقی به نظر می‌رسد، زیرا با افزایش سرعت امکان بروز خطا در سنجش میزان بذر ممکن است افزایش یابد.

در پژوهشی (Abdullahzare et al., 2016) عنوان شد که تغییرات متغیر سرعت پیشروی در سطح احتمال یک درصد بر تغییرات شاخص نکاشت تأثیر معنی‌داری داشته است (Abdullahzare et al., 2016). در پژوهش کنونی، کمترین شاخص نکاشت مربوط به فاصله ۵ سانتی‌متر و بیشترین شاخص نکاشت مربوط به فاصله ۱۵ سانتی‌متر بود. با افزایش فاصله بین بذرها، میزان شاخص نکاشت افزایش یافت. در پژوهشی دیگر (Mandani et al., 2016) اعلام شد که سطوح مختلف فاصله بین بذرهای لوبیا روی خطوط کشت دارای اثر معنی‌داری در سطح ۱٪ بر روی شاخص نکاشت داشت.

دانشگاه کردستان قرار داشت که برای انجام آزمایش‌ها دستگاه به مزرعه مورد نظر انتقال داده شد. زمین مورد نظر یک بار شخم و یک بار دیسک زده شده بود. رطوبت خاک به میزان ۳۰ درصد و نوع خاک رسی لومی بود. دستگاه مورد نظر به وسیله اتصال سه نقطه به تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ متصل شده و در شرایط کنترل شده مورد ارزیابی قرار گرفت.

جدول ۱- خواص فیزیکی بذر نخود

شاخص	مواد آزمایشی (نخود)
طول (mm)	۸/۹
عرض (mm)	۷/۲۷
ضخامت (mm)	۶/۷۳
ضریب کروییت	۰/۸۵
قطر متوسط هندسی (mm)	۷/۴۲
قطر متوسط حسابی (mm)	۷/۶۳
وزن هزاردانه (g)	۲۶۳
رطوبت بر پایه‌ی خشک (%)	۷/۵۰
زاویه پایداری	۱/۱۷۱ ۲۴/۴۰
جرم حجمی ظاهری (kg/m ³)	۸۰۶/۳۱
جرم حجمی واقعی (kg/m ³)	۱۴۲۷/۱۶

نتایج و بحث

شاخص نکاشت

نتایج تجزیه واریانس متغیرهای سرعت پیشروی و فاصله بین بذرها و اثر متقابل آن‌ها بر روی شاخص نکاشت در جدول ۲ آورده شده است. اثر متغیر سرعت پیشروی بر روی شاخص نکاشت در سطح یک درصد معنی‌دار بود.

جدول ۲- نتایج بررسی واریانس شاخص نکاشت

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	سطح معنی‌داری
مدل	۲۱۱۹/۵۰۳	۹	۲۳۵/۵۰۰	۱۱۳۵۴۴۷/۸۰۴	۰/۰۰۰
سرعت	۱۳۰/۹۹۸	۲	۶۵/۴۹۹	۳۱۵۷۹۹/۶۲۵	۰/۰۰۰
فاصله	۰/۰۰۳	۲	۰/۰۰۱	۶/۵۰۰	۰/۰۰۸
سرعت × فاصله	۰/۰۰۱	۴	۰/۰۰۰	۰/۷۴۱	۰/۵۷۶
خطا	۰/۰۰۴	۱۸	۰/۰۰۰		
مجموع	۲۱۱۹/۵۰۶	۲۷			

جدول ۳- نتایج مقایسه میانگین دانکن اثر سرعت پیشروی بر شاخص نکاشت در سطح ۱٪

سرعت	تعداد متغیر	۱	۲	۳
۳	۹	۶/۰۸۶۷		
۵	۹		۸/۲۱۴۴	
۷	۹			۱۱/۴۴۴۴

جدول ۴- نتایج مقایسه میانگین دانکن اثر فاصله بر شاخص نکاشت در سطح ۱٪

فاصله	تعداد متغیر	۱	۲
۵	۹	۸/۵۷۰۰	
۱۰	۹		۸/۵۸۱۱
۱۵	۹		۸/۵۹۴۴

شاخص چند کاشت

پیشروی و فاصله بین بذرها بر روی شاخص چند کاشت در سطح یک درصد معنی‌دار بود. لیکن اثر متقابل این دو متغیر معنی‌دار نبود.

نتایج تجزیه واریانس شاخص چند کاشت حاصل از متغیرهای سرعت پیشروی و فاصله بین بذرها و اثر متقابل آن‌ها در جدول ۵ آورده شده است. اثر متغیرهای سرعت

جدول ۵- نتایج بررسی واریانس شاخص نکاشت

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	سطح معنی‌داری
مدل	۱۴۶۱/۵۱۷	۹	۱۶۲/۳۹۱	۳۴۷۹۸۰/۳۳۳	۰/۰۰۰
سرعت	۱۴/۰۴۵	۲	۷/۰۲۳	۱۵۰۴۸/۷۲۲	۰/۰۰۰
فاصله	۰/۱۵۷	۲	۰/۰۷۸	۱۶۸/۰۳۲	۰/۰۸۰
سرعت × فاصله	۰/۰۰۵	۴	۰/۰۰۱	۲/۴۸۴	۰/۰۸۰
خطا	۰/۰۰۸	۱۸	۰/۰۰۰		
مجموع	۱۴۶۱/۵۲۶	۲۷			

جدول ۶- نتایج مقایسه میانگین دانکن اثر سرعت پیشروی بر شاخص چند کاشت در سطح ۱٪

سرعت (km/h)	تعداد متغیر	۱	۲	۳
۳	۹	۶/۴۴۱۱		
۵	۹		۷/۳۱۵۶	
۷	۹			۸/۲۰۷۸

جدول ۷- نتایج مقایسه میانگین دانکن اثر فاصله بر شاخص چند کاشت در سطح ۱٪

فاصله (cm)	تعداد متغیر	۱	۲	۳
۵	۹	۷/۲۲۸۹		
۱۰	۹		۷/۳۲۰۰	
۱۵	۹			۷/۴۱۵۶

شاخص کیفیت تغذیه

نتایج تجزیه واریانس متغیرهای سرعت پیشروی و فاصله بین بذرها و اثر متقابل آن‌ها بر روی شاخص کیفیت تغذیه در جدول ۸ آورده شده است. اثر متغیرهای سرعت پیشروی و فاصله بین بذرها بر روی شاخص کیفیت تغذیه در سطح یک درصد معنی‌دار بود. لیکن اثر متقابل این دو متغیر معنی‌دار نبود.

نتایج مقایسه میانگین دانکن اثر متغیرهای سرعت پیشروی و فاصله بین بذرها در سطح یک درصد به ترتیب در جدول‌های ۶ و ۷ آورده شده است. کمترین شاخص چند کاشت مربوط به سرعت ۳ کیلومتر بر ساعت و بیشترین شاخص چند کاشت مربوط به سرعت ۷ کیلومتر بر ساعت بود. با افزایش سرعت، میزان شاخص چند کاشت افزایش یافته است. دلیل آن می‌تواند این باشد که با افزایش سرعت امکان بروز خطا در سنجش میزان بذر ممکن است افزایش یابد. هرچند این خطا نسبت به سامانه مرسوم بسیار کمتر بود. همچنین، کمترین شاخص چندکاشت مربوط به فاصله ۵ سانتی‌متر و بیشترین شاخص چندکاشت مربوط به فاصله ۱۵ سانتی‌متر بود. با افزایش فاصله بین بذرها، میزان شاخص نکاشت افزایش یافت. در پژوهشی (Abdullahzare et al., 2016) این نتیجه به دست آمد که تغییرات متغیر سرعت پیشروی در سطح احتمال ۵ درصد بر تغییرات شاخص چند کاشت تأثیر معنی‌داری داشته است. در یک پژوهش (Mandani et al., 2016) این نتیجه حاصل شد که سطوح مختلف فاصله بین بذرهای لوبیا روی خطوط کشت اثر معنی‌داری در سطح ۱٪ بر روی شاخص چندکاشت دارند.

جدول ۸- نتایج بررسی واریانس شاخص کیفیت تغذیه

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	سطح معنی‌داری
مدل	۱۹۱۰۱۰/۸۵۲	۹	۲۱۲۲۳/۴۲۸	۲۳۱۰۶۱۵۱/۴۲۳	۰/۰۰۰
سرعت	۵۹/۹۱۴	۲	۲۹/۹۵۷	۳۲۶۱۴/۴۵۲	۰/۰۰۰
فاصله	۰/۲۰۱	۲	۰/۱۰۰	۱۰۹/۲۱۰	۰/۰۰۰
سرعت × فاصله	۰/۰۰۵	۴	۰/۰۰۱	۱/۳۳۱	۰/۲۹۷
خطا	۰/۰۱۷	۱۸	۰/۰۰۱		
مجموع	۱۹۱۰۱۰/۸۶۸	۲۷			

ساعت و بیشترین شاخص دقت در فاصله کاشت مربوط به سرعت ۷ کیلومتر بر ساعت بود. با افزایش سرعت، میزان شاخص دقت در فاصله کاشت افزایش یافته است. با افزایش سرعت امکان بروز خطا در سنجش میزان بذر ممکن است افزایش یابد. همچنین، کمترین شاخص دقت در فاصله کاشت مربوط به فاصله ۵ سانتی‌متر و بیشترین شاخص دقت در فاصله کاشت مربوط به فاصله ۱۵ سانتی‌متر بود. با افزایش فاصله بین بذر، میزان شاخص دقت در فاصله کاشت افزایش یافت. در پژوهشی (Abdullahzare *et al.*, 2016) این نتیجه به دست آمد که تغییرات متغیر سرعت پیشروی در سطح احتمال ۵ درصد بر تغییرات شاخص دقت در فاصله کاشت تأثیر معنی‌داری داشته است. در یک پژوهش دیگر (Mandani *et al.*, 2016) اعلام شد که سطوح مختلف فاصله بین بذرهای لوبیا روی خطوط کشت اثر معنی‌داری در سطح ۱٪ بر روی شاخص دقت در فاصله کاشت داشت.

جدول ۹- نتایج مقایسه میانگین دانکن اثر سرعت پیشروی بر شاخص کیفیت تغذیه در سطح ۱٪

سرعت	تعداد متغیر	۱	۲	۳
۷	۹	۸۲/۱۱۴۴		
۵	۹		۸۴/۴۷۰۰	
۳	۹			۸۵/۷۰۵۶

جدول ۱۰- نتایج مقایسه میانگین دانکن اثر فاصله بر شاخص کیفیت تغذیه در سطح ۱٪

فاصله	تعداد متغیر	۱	۲	۳
۱۵	۹	۸۳/۹۹۰۰		
۱۰	۹		۸۴/۰۹۸۹	
۵	۹			۸۴/۲۰۱۱

در جدول‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب نتایج مقایسه میانگین دانکن اثر متغیرهای سرعت پیشروی و فاصله بین بذر، در سطح یک درصد آورده شده است. کمترین شاخص کیفیت تغذیه مربوط به سرعت ۷ کیلومتر بر ساعت و بیشترین شاخص کیفیت تغذیه مربوط به سرعت ۳ کیلومتر بر ساعت بود. همان‌طور که معلوم است، با افزایش سرعت، میزان شاخص کیفیت تغذیه کاهش می‌یابد. همچنین، کمترین شاخص کیفیت تغذیه مربوط به فاصله ۱۵ سانتی‌متر و بیشترین شاخص کیفیت تغذیه مربوط به فاصله ۵ سانتی‌متر بود. با افزایش فاصله بین بذر، میزان شاخص کیفیت تغذیه کاهش یافت. در پژوهشی (Abdullahzare *et al.*, 2016) این نتیجه حاصل شد که تغییرات متغیر سرعت پیشروی در سطح احتمال یک درصد بر تغییرات شاخص کیفیت تغذیه تأثیر معنی‌داری داشته است. در پژوهشی دیگر (Mandani *et al.*, 2016) اعلام شد سطوح مختلف فاصله بین بذرهای لوبیا روی خطوط کشت دارای اثر معنی‌داری در سطح ۵٪ بر روی شاخص کیفیت تغذیه داشت.

دقت در فاصله کاشت

نتایج تجزیه واریانس شاخص دقت در فاصله کاشت حاصل از متغیرهای سرعت پیشروی و فاصله بین بذر و اثر متقابل آن‌ها در جدول ۱۱ آورده شده است. اثر متغیرهای سرعت پیشروی و فاصله بین بذر بر روی شاخص دقت در فاصله کاشت در سطح یک درصد معنی‌دار بود. لیکن اثر متقابل این دو متغیر معنی‌دار نبود.

نتایج مقایسه میانگین دانکن اثر متغیرهای سرعت پیشروی و فاصله بین بذر در سطح یک درصد به ترتیب در جدول‌های ۱۲ و ۱۳ آورده شده است. کمترین شاخص دقت در فاصله کاشت مربوط به سرعت ۳ کیلومتر بر

جدول ۱۱- نتایج بررسی واریانس شاخص دقت در فاصله کاشت

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	سطح معنی‌داری
مدل	۲۶۶۷/۰۹۸	۹	۲۹۶/۳۴۴	۱۴۰۳۷۲۵/۹۴۷	۰/۰۰۰
سرعت	۲۷/۳۳۲	۲	۱۳/۶۶۶	۶۴۷۳۳/۱۰۵	۰/۰۰۰
فاصله	۰/۰۲۵	۲	۰/۰۱۳	۵۹/۴۲۱	۰/۰۰۰
سرعت × فاصله	۰/۰۰۱	۴	۰/۰۰۰	۱/۶۸۴	۰/۱۹۷
خطا	۰/۰۰۴	۱۸	۰/۰۰۰		
مجموع	۲۶۶۷/۱۰۲	۲۷			

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، ساخت و ارزیابی یک سامانه هوشمند ردیف‌کار ماشین کاشت نخود انجام شد. هدف اصلی در این پژوهش بررسی یکنواختی و دقت در کاشت سامانه فوق بود و بذر نخود برای آزمودن شاخص‌های کاشت انتخاب شد، لیکن احتمال دارد که برای سایر بذرهایی که به صورت ردیفی کشت می‌شوند نیز اثربخش باشد و شایسته است در مطالعه‌ای این سامانه روی بذرهایی دیگر نیز مورد آزمون قرار گیرد. تأثیر متغیر سرعت بر روی شاخص‌های نکاشت، چند کاشت، کیفیت تغذیه و دقت در فاصله کاشت در سطح یک درصد معنی‌دار بود. تأثیر متغیر فاصله بین بذرها نیز بر روی شاخص‌های چند کاشت، کیفیت تغذیه و دقت در فاصله کاشت در سطح یک درصد معنی‌دار بود، لیکن اثر معنی‌داری بر روی شاخص نکاشت نداشت. همچنین اثر متقابل بین متغیرهای سرعت و فاصله بین بذرها در هیچ کدام از شاخص‌ها وجود نداشت. رابطه بین متغیرهای ثابت سرعت و فاصله بین بذرها با متغیرهای عملکردی موزع با استفاده از رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی بررسی شد. این مدل رگرسیونی توانست با ضریب تبیین بالایی رابطه بین متغیرهای ثابت و متغیر را برازش کند. با بررسی شاخص‌های اندازه‌گیری شده، یکنواختی و دقت در کاشت نخود با این موزع خودکار مطلوب بود و به نظر می‌رسد سامانه دارای دقت مطلوب است، لیکن بهتر است برای سایر بذرها نیز مورد بررسی قرار گیرد. همچنین بهتر است از سایر روش‌های سنجش بذر استفاده شود و نتایج آن با روش کنونی مقایسه گردد.

جدول ۱۲- نتایج مقایسه میانگین دانکن اثر سرعت پیشروی

سرعت	تعداد متغیر	۱	۲	۳
۳	۹	۸/۶۶۰۰		
۵	۹		۹/۸۷۸۹	
۷	۹			۱۱/۱۲۴۴

جدول ۱۳- نتایج مقایسه میانگین دانکن اثر فاصله بر شاخص

فاصله	تعداد متغیر	۱	۲	۳
۵	۹	۹/۸۴۸۹		
۱۰	۹		۹/۸۹۱۱	
۱۵	۹			۹/۹۲۳۳

نتایج رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی

در جدول ۱۴ نتایج رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی رابطه متغیرهای ثابت سرعت و فاصله بین بذرها بر روی شاخص‌های نکاشت، چند کاشت، کیفیت تغذیه و دقت در فاصله کاشت نشان داده شده است. طبق نتایج، متغیر سرعت و فاصله با شاخص‌های ذکر شده رابطه عکس دارند. همچنین این مدل رگرسیونی توانسته است با دقت خوبی رابطه بین متغیرهای ثابت و وابسته را برازش کند. کمترین ضریب تبیین در این روابط ۰/۷۹۸۱ و بیشترین ضریب تبیین ۰/۹۵۶۵ بود. جهت مقایسه، برازش با مدل‌های مرسوم مانند خطی، لگاریتمی و نمایی نیز انجام شد. در مقایسه این مدل‌ها نسبت به مدل‌های مرسوم، ضریب تبیین به دست آمده در مدل‌های رگرسیونی چند جمله‌ای تکاملی، بیشتر بوده و توانایی برازش بهتری داشت. در مدل‌های رگرسیونی، D نشان دهنده فاصله و S نشان دهنده سرعت است.

جدول ۱۴- نتایج رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی رابطه متغیرهای ثابت سرعت و فاصله بین بذرها بر روی شاخص‌های نکاشت، چند

کاشت، کیفیت تغذیه و دقت در فاصله کاشت

شاخص‌ها	سرعت (km/h)	فاصله بین بذرها (cm)
نکاشت	R^2	R^2
چند کاشت	R^2	R^2
کیفیت تغذیه	R^2	R^2
دقت در فاصله کاشت	R^2	R^2

- Kachman, S.D., & Smith, J.A. 1995. Alternative measures of accuracy in plant spacing for planters using single seed metering. *Transactions of the ASAE*, 38(2): 379-387.
- Mandani, A., & Karparvarfard, S. H. 2016. Development and laboratory evaluation of a mixed planting machine for corn and bean. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 47(2): 257-267.
- Mohsenin, N.N. 1986. Physical Properties of Plant and Animal Materials. Structure, Physical Characteristics and Mechanical Properties. *Gordon and Breach Science Publishers*, 31(7): 702-702.
- Panning, J. W., Kocher, M. F., Smith, J. A., & Kachman, S. D. 2000. Laboratory and field testing of seed spacing uniformity for sugar beet planters. *Applied Engineering in Agriculture*, 16(1): 7-13.
- Quanawi, L., Xiantao, H.Li.Y., Dongxing, Z., Tao, C., Zhe, Q., Bingxin, Y., Mantao, W., & Tiantiang, Z. 2017. Effect of travel speed on seed spacing uniformity of corn seed meter. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10(4): 98-106.
- Yazgi, A., & Degirmencioglu, A. 2007. Optimisation of the seed spacing uniformity performance of a vacuum-type precision seeder using response surface methodology. *Biosystems engineering*, 97(3): 347-356.
- منابع
- Abdullahzare, Z., Asoodar, M.A., Kazemi, N., Rahnama, M., & Abdanan Mehdizadeh, S. 2016. Optimization of the most important operational parameters of a pneumatic seeder using real-time monitoring for Cucumber and Watermelon seeds. *Journal of Agricultural Machinery*, 6(1): 35-48. (in Persian).
- Al-Mallahi, A., & Kataoka, T. 2013. Estimation of mass flow of seeds using fibre sensor and multiple linear regression modeling. *Computers and Electronics in Agriculture*, 99: 116-122.
- Anantachar, M., Kumar, P.G., & Guruswamy, T. 2010. Neural network prediction of performance parameters of an inclined plate seed metering device and its reverse mapping for the determination of optimum design and operational parameters. *Computers and Electronics in Agriculture*, 72(2): 87-98.
- Bahrami, Gh., & Kiani, S. 2016. Flow Rate Determination of Granular Material by Using Sound and Multivariate Data Analysis. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 47(3): 524-430. (in Persian).
- Balasubramanian, D. 2001. PH—Postharvest technology: Physical properties of raw cashew nut. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 78(3): 291-297.
- Datta, R. K. 1974. Development of some seeders with particular reference to pneumatic seed drills. *The Harvester, Indian Institute of Technology*, 16: 26-29.
- Dursun, E. & Dursun, I. 2005. Some physical properties of caper seed. *Biosystems Engineering*, 92(2): 237-245.
- Ghasemi, M.G., Mobli, H., Jafari, A., Keyhani, A.R., Soltanabadi, & M.H. and Rafiee, S. 2008. Some physical properties of rough rice (*Oryza Sativa L*) Grain. *Journal of Cereal Science*, 47: 496-501.
- Giustolisi, O., & Savic, D.A. 2006. A symbolic data-driven technique based on evolutionary polynomial regression. *Journal of Hydroinformatics*, 8(3): 207-222.
- Griffith, D. R., Kladvko, E. J., Mannerling, J. V., West, T. D., & Parsons, S. D. 1988. Long-term tillage and rotation effects on corn growth and yield on high and low organic matter, poorly drained soils. *Agronomy Journal*, 80(4): 599-605.
- Kabas, O., Yilmaz, E., Ozmerzi, A. & Akinci, I. 2007. Some physical and nutritional properties of cowpea seed (*Vigna sinensis L.*). *Journal of Food Engineering*, 79: 1405-1409.