

هوشمندسازی و مدل‌سازی ماشین پشته‌ساز حفاظتی با شیار بازکن‌های مختلف

بهنام سپهر^۱ و حسین حاجی آقا علیزاده^{*۱}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۷/۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۲

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

* مسئول مکاتبه h-alizade@basu.ac.ir

چکیده

مطالعه حاضر به منظور توسعه دانش فنی کاربرد برخی روش‌های کاشت، معرفی روش‌های کاشت جدید و حذف روش‌های سنتی گذشته است. مدل‌سازی تیغه‌های کارنده و خاک، با استفاده از نرم‌افزار Abaqus 6.12 و با آزمون نشست صفحه‌ای انجام شد. در این شبیه‌سازی خاک به‌عنوان جسم الاستوپلاستیک با دو معیار موهر-کولمب، دراگر-پراگر و تأثیر کارنده به‌صورت نیروی فشاری در نظر گرفته می‌شود. سامانه پایش عملکرد خطی کار با ارائه بازخوردی برخط از وضعیت کاری قسمت‌های مختلف خطی کار بازده عملیات کاشت را بهبود می‌دهد. برای پایش عملکرد ماشین، دوربین‌هایی بر موزع‌ها و یک دوربین بجای مارکر استفاده شد. این آزمایش در مزرعه دانشگاه بوعلی سینا همدان با بافت شنی رسی لومی در سطح رطوبتی ۱۵ درصد انجام شد. کارنده‌ها در شش سطح b1: وی قلمی، b2: یو شکل، b3: تی وارون، b4: وی شکل دو بشقابی، b5: صلیبی و b6: لاله‌ای شکل مدل‌سازی شدند. تراکم خاک به‌عنوان مشکلی پیچیده و چندبعدی شامل تأثیر متقابل خاک و ماشین شناخته می‌شود. در فرآیند کاشت به‌وسیله خطی کارها، مشکلاتی نظیر خرابی‌های سامانه‌های توزیع بذر، خالی شدن محفظه بذر و موارد مشابه می‌تواند به‌طور گسترده اتفاق می‌افتد. نتایج مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس نشان داد، مدل رفتاری دراگر-پراگر با ضریب همبستگی ۹۳٪ مطابقت بالاتری نسبت به مدل موهر-کولمب با ضریب ۶۳٪ داشت. همچنین نتایج نشان داد که مقدار تنش و جابجایی در لایه‌های نزدیک به سطح بارگذاری بیشتر و با حرکت به سمت لایه‌های پایین‌تر این مقدار کاهش می‌یابد. هرچه از محل مقدار بار محوری وارد شده دورتر می‌شویم توزیع تنش قائم در سطح خاک کاهش می‌یابد و کشیدگی نمودار روی محور افقی مختصات تنش کاهش یافته و به محور عمودی مختصات نزدیک می‌شود.

واژه‌های کلیدی: کارنده، کلا، مدل‌سازی، نخود، هوشمندسازی

Intellectualizing and Modeling of Protection Stacking Machine with Different Furrowers

Behnam Sepehr¹, Hossein Haji Agha Alizadeh^{1*}

Received: 24 Sep 2022

Accepted: 2 Jan 2023

1- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Bu-Ali Sina, Hamedan, Iran

*Corresponding author: h-alizade@basu.ac.ir

Abstract

The study is to develop technical knowledge of the application of some planting methods, introduce new planting arrangements and eliminate the traditional methods. The interactions of planting blades and soil were modeled using Abaqus 6.12 software and the plate sinkage test. In this simulation, soil is considered as an elasto-plastic body with two criteria: Mohr-Columbus, Drucker-Prager where plowing effect considered as compressive force. The linear work performance monitoring system improves the efficiency of planting operations by providing online feedback from the working conditions of seed driller parts. To monitor the performance of the machine, some cameras on the distributors and a camera instead of a marker were used. This experiment was performed in the farm of Bu Ali Sina University of Hamadan with sandy-loamy tissue at a moisture level of 15%. Planter furrowers were in six types: b1: v-shaped, b2: u-shaped, b3: inverted t, b4: two-plate v-shaped, b5: cross-shaped, and b6: tulip-shaped. Soil compaction is known as a complex and multidimensional problem involving the interaction of soil and machine. In the process of planting by seed driller, the issues such as failures of seed distribution systems, emptying of the seed container, etc., can occur widely. The modeling results with Abacus software showed that the Drucker-Prager behavioral model with a correlation coefficient of 93% had a higher agreement than the Mohr-Columb model with a coefficient of 63%. The amount of stress and displacement in the layers close to the load surface was high. It decreased from upper to lower layers.

Keywords: Canola, Chickpeas, Intelligence, Modeling, Planter

How to cite:

Sepehr, B., Haji Agha Alizadeh, H. 2023. Intellectualizing and Modeling of Protection Stacking Machine with Different Furrowers. *Journal of Agricultural Mechanization* 7 (3): 35–44.

۱- مقدمه

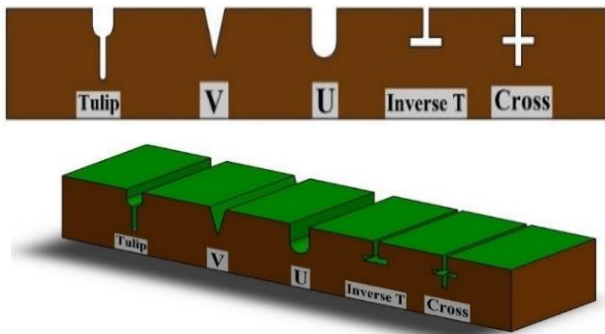
حفظ کیفیت خاک و افزایش در دسترس بودن آب یک چالش مهم برای اطمینان از تولید مواد غذایی برای جمعیت در حال رشد جهانی است. مدیریت حفاظتی محصولات، همراه با پوشش خاک و تنوع محصولات، می‌تواند تلفات آب و خاک را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد (Sartas, 2021). اقدامات و ارزیابی‌هایی برای گسترش راه‌حل‌های هوشمند به‌منظور انجام کشاورزی حفاظتی در حوضه مدیترانه صورت گرفته است. با در نظر گرفتن تکامل استراتژی‌ها و ماشین‌آلات مورد استفاده برای انجام سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی در زمینه‌های مختلف در ۳۰ سال گذشته و همچنین اثرات ناشی از تصویب آن‌ها بر بهره‌وری از محصولات علفی و باغی، کنترل علف‌های هرز و امکان‌سنجی اقتصادی، در مقایسه با آن‌هایی که با استفاده از تکنیک‌های معمولی مبتنی بر وارونگی خاک به‌دست آمده است، نشان‌دهنده اهمیت موضوع خاک‌ورزی حفاظتی است (Failla et al., 2021). در دوره مدرن، رشد جمعیت منجر به افزایش بسیاری از موضوعات مرتبط شده است. یکی از این موارد علل مرتبط با کشاورزی است. کشاورزان در سرتاسر جهان نظرات مبهم و متنوعی در مورد ادغام فناوری در فعالیت‌های کشاورزی دارند. برخی از آن‌ها مشتاق و متمرکز بر پذیرش این فناوری هستند، برخی دیگر نسبت به معرفی فن‌آوری‌های مدرن محتاط و مبهوت هستند، درحالی‌که اکثر آن‌ها برای استفاده از فن‌آوری‌ها برای افزایش بازده و افزایش عملکرد محتاط هستند (Rakhra & Singh, 2021). امروزه استفاده از ماشین‌آلات در جنبه‌های مختلف کشاورزی سازگاری بیشتری یافته است، زیرا به بهبود شیوه‌های کشاورزی کمک می‌کند. به تدریج سطح بالاتری از ماشین‌آلات کشاورزی در تمام بخش‌های توسعه معرفی شده‌اند (Munar et al., 2021). امروزه تقاضا برای تجهیزات کشاورزی که نیاز به تلاش، زمان و نیروی کاری کمتری دارند روزبه‌روز در حال افزایش است (Karthikeyam et al., 2017). شیار بازکن‌ها جزء اصلی واحد کارنده‌اند که ممکن است با ضمایم ردیف تمیز کن نیز ترکیب شده باشند و هدف از آن‌ها باز کردن شیار و قرار دادن بذر و کود در خاک است. گزارش شده است که نوع شیار بازکن، میزان جوانه‌زنی و استقرار گیاه چه را به‌ویژه در خاک‌های مستعد سله بستن، تحت تأثیر قرار می‌دهد (Soloviev et al., 2021). شیار بازکن‌های کاردی علاوه بر اینکه نیاز به توان بیشتر و سوخت بیشتر دارند، ظرفیت مزرعه‌ای آن‌ها کمتر است و باعث به هم خوردگی بیشتر خاک و شکستن محدود لایه فشرده شده خاک می‌شوند (Conte et al., 2011).

تجهیزات سنگین امروزه این پتانسیل را دارند که باعث افزایش شدید مشکلات تراکم خاک شوند. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که تراکم خاک منجر به کاهش عملکرد و کیفیت محصولات، افزایش فرسایش ادوات و توان مورد نیاز خاک‌ورزی، کاهش رشد ریشه، کاهش دسترسی به مواد مغذی و افزایش تلفات مواد مغذی خاک به‌وسیله

آبشویی، ایجاد رواناب و کاهش تخلخل می‌شود که می‌تواند بر رشد گیاه تأثیر بگذارد. تأثیر تراکم خاک بر جذب و تلفات مواد مغذی مورد بررسی قرار گرفته است. شواهد نشان می‌دهد روابط تعاملی بین میزان تراکم خاک، رشد ریشه، آب خاک، وضعیت هوای خاک و عرضه و جذب مواد مغذی توسط گیاهان وجود دارد (Sivarajan et al., 2018). در تحقیقات کشاورزی، مفهوم تنش پیش‌تراکم در مورد فشرده‌گی سریع خاک‌های غیراشباع کاربرد دارد؛ که تنش پیش‌تراکم به‌عنوان حداکثر تنشی که خاک می‌تواند تحمل کند بدون اینکه فشرده‌گی آن افزایش یابد، تعریف می‌شود (Naderi-Boldaji et al., 2018). این تنش به‌عنوان معیاری از مقاومت خاک جهت پایدار نگه داشتن ساختمان خاک در برابر نیروهای داخلی و خارجی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Gregory et al., 2006). کیفیت عملیات خاک‌ورزی از دیدگاه مدیریت خاک و تولید محصول همیشه مورد توجه قرار گرفته است و تلاش شده است تا ابزارها به‌گونه‌ای طراحی شوند تا در اثر تقابل آن‌ها با خاک، در حد امکان از تخریب خاک و نیز اتلاف انرژی که خود شامل محدودیت‌های اقتصادی و زیست‌محیطی است، پیشگیری شود. بهینه‌سازی ابزارهای خاک‌ورزی و اصلاح آن‌ها، مستلزم انجام آزمون‌های فراوانی در شرایط واقعی می‌باشند که خود مستلزم زمان و هزینه‌های زیادی است (Mardani et al., 2018). مزیت روش‌های مدل‌سازی نسبت به روش‌های عملی و آزمایشگاهی این است که در روش‌های مدل‌سازی خواص خاک در هر نقطه را با دقت بیشتری می‌توان تعیین نمود و نیز امکان بررسی تأثیر پارامترهای مختلف خاک بر تغییر شکل و تنش‌های ایجاد شده وجود دارد، همچنین در این روش‌ها می‌توان نیروهای وارده بر ابزار را در هر مرحله از عملیات بارگذاری پیش‌بینی کرد. در شرایطی که مدل مورد بحث مورد اعتبار سنجی قرار گرفته باشد (Mardani et al., 2018).

در هوشمندسازی سیستم پایش خطی کارها، یکی از متداول‌ترین روش‌ها به‌منظور پایش کاشت در امتداد مسیر حرکت کارنده‌ها استفاده از حسگرهای نوری مادون قرمز است که به علت آسانی کاربرد و دقت خوب توسط پژوهشگران به‌کاربرده شده است. عبور بذر از بین پرتوهای نوری مادون قرمز، مانع رسیدن این پرتوها به گیرنده می‌شود. عدم دریافت پرتوهای نوری به‌اندازه مناسب از طرف گیرنده، باعث تغییر ولتاژ حسگرهای دیود و تغییر ولتاژ خروجی به عبور جریان بذر تفسیر می‌گردد (Karimi et al., 2020). سامانه‌ای برای تولید یک پروفایل کاشت از بذرهای کشت شده توسط یک کارنده پیشنهاد شد. الگوی کاشت توسط یک پردازنده که با یک دستگاه زمان‌سنج و یک حسگر بذر در ارتباط بود امکان تولید داشت. دستگاه زمان‌سنج برای ارائه برچسب زمانی مرتبط با حضور بذرهای نشانه‌گذاری شده توسط حسگر بذر، پیکربندی می‌شود. سامانه پیشنهادی می‌تواند با توجه به نقشه جمعیت بذر در مزرعه مبنی بر سرعت پیشروی کارنده و زمان رهاسازی بذر، الگوی کاشت را به دست آورد (Goldman et al., 2013).

نفوذ بیشتر ریشه برای دستیابی به رطوبت مطابق شکل ۱ استفاده گردید.



شکل ۱- آرایش کاشت کارنده ها
Fig 1. Planting arrangement of the planters

۲-۲- طرح آزمایش

در این آزمایش دو محصول کلزا و نخود به ترتیب به عنوان ریزدانه و درشت دانه، با چهار تکرار مورد بررسی قرار گرفتند. نوع کارنده در شش سطح (تیمار) b_1 : وی شکل قلمی، b_2 : یو شکل، b_3 : تی وارون، b_4 : صلیبی، b_5 : وی شکل دو بشقابی و b_6 : لاله ای شکل آزمایش شدند. کرت ها با ۱۰۰ متر طول و ۲ متر عرض بودند. مساحت زمین کشت شده ۱۰۰۰۰ مترمربع بود. پشته ساز دستگاه مورد استفاده قابلیت ساخت دوپشته ۶۰ سانتی متری با سه جویچه را داشت.

۲-۳- عمق کار

در این ماشین از شش نوع کارنده با پنج نوع آرایش کشت مختلف استفاده شده است که در جدول ۱ عمق کاشت هر کارنده نشان داده شده است. عمق نفوذ بهاره و پاییزه دارد (کشت بهاره با پاییزه فرق می کند). زمان نفوذ صفر تا ده ثانیه است.

هدف کلی از انجام این پژوهش، معرفی دستگاهی با روش کاشت مناسب برای ماشین آلات کشت مستقیم ایران، توسعه دانش فنی کاربرد برخی روش های کاشت، حذف روش های سنتی گذشته، افزایش اعتماد کشاورزان به استفاده از ماشین های کاشت برای کشت محصولات ریزدانه، مدل سازی کارنده ها به منظور معرفی بهینه ترین نوع کارنده برای خاک ایران و هوشمند سازی ماشین های کاشت و حذف روش های کم بازده گذشته است.

۲- مواد و روش ها

ماشین بذرکار کود کار کشت مستقیم پشته ساز حفاظتی از فناوری های روز دنیا محسوب می شود. این تحقیق در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه بوعلی سینا همدان با عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۴۷ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۲۸ دقیقه شرقی و ارتفاع از سطح دریا ۱۸۴۴ متر اجرا شد. ماشین ساخته شده برای پایش عملکرد در فروردین ماه ۱۴۰۰ در دانشگاه بوعلی سینای همدان ارزیابی شد. تراکتور مورد استفاده در این آزمایش مدل جاندر ۳۱۴۰ بود. مدل سازی تیغه های کارنده پس از ساخت دستگاه و ارزیابی مزرعه ای، با استفاده از نرم افزار آباکوس^۱ ۲۰۱۸ انجام شد. منظور از مدل سازی در اینجا این است که نیروهای وارده به تیغه و خاک تحلیل دینامیکی گردید تا به وسیله آن تنش های وارده به تیغه و خاک بررسی و بتوان تیغه ای با کمترین تنش در خاک برای تحقیقات بعدی طراحی نمود.

۲-۱- آرایش های کاشت

در آرایش کاشت صلیبی از سه سطح به ترتیب برای بذر، کود و جمع آوری آب، آرایش T وارون از دو سطح برای بذر و کود، در آرایش U از یک سطح، برای بذر و کود و یک حوضچه برای ذخیره آب، آرایش V فاصله کمتر بذر و یک سطح برای بذر و کود و آرایش قیفی برای

جدول ۱- عمق کاشت کارنده ها
Table 1. Planting depth of seed drillers

عمق کاشت کود (سانتی متر) Fertilizer planting depth (cm)	عمق کاشت بذر (سانتی متر) Seed planting depth (cm)	آرایش کاشت (نوع کارنده) planting arrangement	ردیف Row
6	7-12	صلیبی (cross)	1
5	1-6	T وارون (T inverse)	2
6	5-7	U شکل (U shape)	3
5	1-6	V شکل قلمی (V shape)	4
5	1-6	V شکل دو بشقابی (V shape with two plates)	5
6	7-12	قیفی شکل (لاله ای شکل) (Tulip shape)	6

¹ Abaqus2018

۲-۴- پایش عملکرد

سامانه پایش عملکرد، میزان بذر و کود موجود در مخزن خطی کار را از طریق سنسور تعبیه شده در داخل مخزن به طور پیوسته به راننده تراکتور از طریق مانیتور نشان می دهد. در نهایت پس از برآورد میزان بذر به ازای هر واحد سطح و ثبت موقعیت مکانی توسط حسگر موقعیت یاب، داده های مربوطه انتقال و نقاط کاشته شده در مزرعه تهیه گردید و به راننده نشان داده شد. بر روی موزع بذر از یک دوربین دیجیتال برای پایش شکستگی و عدم تخلیه بذور و یک دوربین بر روی موزع کود برای پایش جریان کود استفاده شد. در این سامانه برای اولین بار تلاش گردید مارکر مکانیکی موجود در دستگاه ها را با دوربین جایگزین نمود تا راننده بجای تنظیمات اشتباه مارکر مکانیکی از نشانگر دیجیتالی برای خطوط کشت خود استفاده نماید (شکل ۲). دوربین مورد استفاده برای موزع ها و مارکر، مدل زنوتیک ۱۳۸، مانیتور مدل Ziqiao، سنسور سطح سنج آلتراسونیک مدل ULM-53L مورد استفاده در مخازن بذر و کود و سنسور موقعیت یاب مورد استفاده در اینجا مدل GMS7-CR6 GPS MODULE (همگی ساخت چین) در شکل ۳ نشان داده شده است که توسط یک رابط گرافیکی که در شکل ۴ نشان داده شده است، به مانیتور متصل شده اند. رابط کاربری گرافیکی به مفهومی استاندارد در حوزه برنامه نویسی تبدیل شده است. کاربران با وجود این رابط به راحتی می توانند از کامپیوترها و سایر دستگاه های الکترونیکی استفاده کنند. در اینجا با دست کاری مستقیم آیکون های گرافیکی مثل دکمه ها، تب ها، منوها و غیره از این فناوری استفاده شد. رابط گرافیکی مدل Schneider (ساخت چین) مورد استفاده در این دستگاه در شکل ۵ نشان داده شده است.



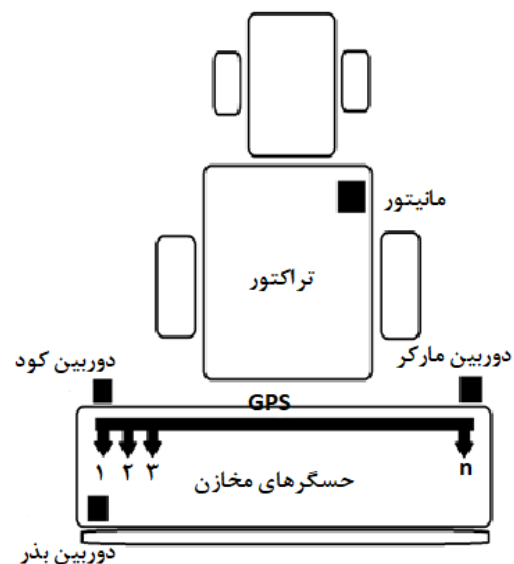
شکل ۳- تجهیزات پایش عملکرد
Fig 3. Performance monitoring equipment



شکل ۴- رابط گرافیکی
Fig 4. Graphical interface

۲-۵- مدل سازی

حجم خاک با عناصر نوع CAX4R که یک عنصر مکعب هشت گره ای را نشان می دهند مش بندی شده است؛ به طوری که هر گره تنها سه درجه آزادی (حرکت انتقالی) مطابق با محورهای مختصات دارد. برای شبیه سازی خاک نیاز به خواص فیزیکی خاک است که در جدول ۲ نشان داده شده است. ناحیه ای که کارنده در داخل آن حرکت نمود 0.73 متر طول، 0.1 متر عرض و عمق صفر تا 22 سانتی متری (برحسب نوع کارنده) داشت. با داشتن زاویه اصطکاک داخلی خاک (Φ) و چسبندگی خاک (C) در مدل موهبر کلمب، مقادیر k ، β و d به ترتیب از روابط ۱ تا ۳ محاسبه شدند (Khodaei et al., 2016; Alexandrou & Earl, 1995).



شکل ۲- طرحواره کلی سامانه پایش عملکرد
Fig 2. General schematic of performance monitoring system

جدول ۲- پارامترهای مربوط به خاک
Table 2. Soil related parameters

زایه اتساع (Expansion angle)	زاویه اصطکاک داخلی دراکر- پراگر (Drucker-Prager internal friction angle)	نسبت تنش تسلیم (Yield stress ratio)	چسبندگی (کیلو پاسکال) (Stickiness (kPa))
20	36	0.78	26.12
ضریب پواسون (Poisson's ratio)	مدول الاستیسیته (کیلو پاسکال) (Modulus of elasticity (kpa))	چگالی (گرم بر سانتی متر مربع) (density(g/cm))	رطوبت (%) (humidity (%))
0.3	2000	1.5	15

۲-۵-۲- گام های مختلف برای شبیه سازی فشردگی خاک

۲-۵-۲-۱- مدل هندسی آزمون (آزمون نشست صفحه ای)

مدل هندسی آزمون نشست صفحه ای شامل دو قسمت مدل نمونه خاک و کارنده است که به صورت متقارن نسبت به محور Y طراحی شدند. در این صورت، نمونه خاک و کارنده در دو پارت مجزا در سیستم مختصات X-Y ایجاد شدند. در پارت اول خاک بانام Soil نام گذاری شد. نوع نمونه خاک تغییر شکل پذیر^۱ انتخاب شد که قابلیت تغییر شکل تحت بار دارد. شکل آن به صورت Shell feature انتخاب شد که بعد ضخامت در مقایسه با طول و عرض بسیار ناچیز است. در آزمون انجام شده، خاک با ابعاد عمق ۰/۹ m و طول ۳/۲ m و عرض ۰/۸ m رسم گردید. در پارت دوم کارنده با نام Planter نام گذاری گردید. نوع کارنده (Axisymmetric Analytical Rigid) انتخاب شد که رفتار آن صلب است.

به خاطر اینکه تغییر شکل خاک نسبت به کارنده زیاد است، فرض نمودیم کارنده صلب است و دلیل دیگر این است که مدول یانگ کارنده ها از مدول یانگ خاک بیشتر است (Drescher, 2009). شکل آن به صورت Wire feature انتخاب شد که دو بعد آن در مقایسه با یک بعد آن بسیار کوچک اند. کارنده از طریق نرم افزار Catia طراحی شد و در داخل نرم افزار آباکوس فراخوانی شد. سپس یک نقطه به عنوان گره مرجع (RP) برای آن لحاظ شد به دلیل اینکه شرایط مرزی و بارگذاری به قطعه اعمال شود. برای شبیه سازی رفتار کارنده ها، از نوع عنصر R3D4 استفاده شد. این نوع عنصر یک عنصر مکعب با چهار گره در گوشه های یک مکعب است. در مجموع ۱/۷۴۸ عنصر در کارنده ایجاد شده است. این نوع عناصر باید دارای یک نقطه مرجع برای بارگیری یا به دست آوردن داده ها از آن باشند؛ بنابراین، در مرکز شکل (در سطح تقارن)، نقطه مرجع تعریف گردید تا شرایط مرزی بر روی آن اعمال شود. به منظور حل مسئله نیاز است تا خواص خاک تعریف گردد.

ابتدا مدول کشسانی و ضریب پواسون انتخاب شدند و در پایان چگالی خاک به نرم افزار وارد گردید. در بخش Plastic، معیار تسلیم

$$K = \frac{3 - \sin \phi}{3 + \sin \phi} \quad (1)$$

$$\tan \beta = \frac{6 \sin \phi}{3 - \sin \phi} \quad (2)$$

$$D = c \frac{\cos \phi}{3 - \sin \phi} \quad (3)$$

سطح عملکرد (F)، مطابق با فرمول ۴ تا ۷ در مدل دراکر-پراگر به دست آمد (Mizuno & Chen, 1983).

$$F = \sqrt{J_2} + \alpha I_1 - k = 0 \quad (4)$$

$$I_1 = \sigma \quad (5)$$

$$I_2 = 1/2(I_1^2 - \sigma^2) \quad (6)$$

$$= 1/3 I_1^2 - I_2 J_2 \quad (7)$$

معیار دراکر-پراگر گزینه پیش فرض برای ویژگی پلاستیسیته خاک است. در شرایط پلاستیسیته خاک، می توان از معیار موهر-کلمب استفاده کرد. در آباکوس / اکسپلیسیت شرایط عملکرد موهر-کلمب را نمی توان مستقیماً استفاده کرد و توسط شرایط عملکرد اصلاح شده دراکر-پراگر با پتانسیل جریان مربوطه یا غیر مرتبط برآورد می شود (رابطه ۸) (Hambleton & Drescher, 2009).

$$F = \frac{1}{2}(\sigma_{max} - \sigma_{min}) + \frac{1}{2}(\sigma_{max} + \sigma_{min}) \sin \phi - c \cos \phi = 0 \quad (8)$$

هر دو معیار دراکر-پراگر و موهر کلمب در پلاستیسیته خاک از پیش تعریف شده اند.

۲-۵-۱- روش المان محدود

در پروژه حاضر از روش المان محدود و توسط نرم افزار آباکوس ورژن ۶،۱۲ برای شبیه سازی رفتار خاک طی عملیات فشردگی ناشی از ورود کارنده ها به زمین استفاده شده است. تحلیل هر مسئله در نرم افزار المان محدود مبتنی بر سه مرحله پیش پردازش، پردازش و پس پردازش است. در این مطالعه، آزمون نشست صفحه ای خاک به صورت متقارن نسبت به محور^۱ با استفاده از نرم افزار آباکوس شبیه سازی شد. زیرا شرایط مرزی و شرایط بارگذاری هردو متقارن هستند.

² Axisymmetric deformable

¹ Axi-symmetric

منجر به افزایش زمان تحلیل می‌شد و به همین دلیل از مش بندی آن‌ها صرف نظر شد و فقط نمونه خاک مش بندی شد. در این پژوهش، از روش مش ساختاریافته برای مش بندی محیط خاک با استفاده از المان‌های آجری خطی متقارن چهار گره‌ای (CAX4R) برای مش بندی خاک استفاده شد. در نهایت ۵۵۰ المان برای شبیه‌سازی خاک استفاده گردید. کوچک‌ترین طول عنصر ۰/۰۱ متر در نظر گرفته شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خاک مورد آزمایش

پیش از شروع کاشت به منظور تشخیص ترکیبات خاک، خاک مورد استفاده تجزیه و تحلیل شد. نتایج تجزیه و تحلیل خاک (بافت خاک) در جدول ۳ آمده است. داده‌های جدول ۳ با استفاده از دستگاه‌های اسپکترومتر مدل uv-1600، فلیم فتومتر pfpy، اتمیک ابزوربشن Perkin3110، سانتریفیوژ Z200A-Hermlf، کج‌دال Bakhshi، شیکر F183، کندانسور، Ph متر ۳۴۳۳۰، کوره الکتریکی Thermolab، همزن Magnetmin 2070، بن ماری Te-8j و هات پلیت F183 آزمایشگاه فیزیک و مکانیک خاک اداره راه و شهرسازی استان همدان استخراج گردید. برای استخراج درصد رطوبت و دمای خاک از دستگاه دماسنج-رطوبت‌سنج چینی کمپانی Temperature، مدل HTC-2 که مجهز به سنسور خارجی برای کنترل دما و رطوبت خاک است، استفاده شد.

جدول ۳- نتایج تجزیه و تحلیل خاک
Table 3. Results of soil analysis

مقدار (content)	عناصر تشکیل دهنده (composing elements)
6.89	pH
0.2 (d/m)	(EC) هدایت الکتریکی
3 (mg/lit)	(Mg) منیزیم
27.89 (mg/lit)	(K) پتاسیم
2.8 (mg/lit)	(P) فسفر
0.15 (mg/g)	(N) نیتروژن
%7.33	درصد رطوبت (Moisture percentage)
0-30(cm)	عمق نمونه (Sample depth)
%48	ماسه (sand)
%35	لای (Silt)
%17	رس (clay)
لومی با 18% سنگریزه (Loam with 18% gravel)	بافت (Texture)

دراگر-پراگر انتخاب شد. β زاویه اصطکاک داخلی دراکر-پراگر و K نسبت جریان به ترتیب ۳۶ و ۰/۷۸ انتخاب شدند. ϕ زاویه اتساع دراکر-پراگر ۱۴ در نظر گرفته شد؛ سپس مقادیر تنش و کرنش پلاستیک وارد شدند.

۲-۲-۵-۲- مونتاز کردن مدل‌ها

در ماژول Assembly خاک، کارنده‌ها به صورت تک‌به‌تک فراخوانی شدند و در موقعیت مناسب و مدنظر شرایط آزمایشگاهی قرار گرفتند. کارنده‌ها بر روی سطح نمونه خاک بلافاصله قرار گرفتند.

۲-۲-۵-۳- تعیین نوع حل تحلیل و مراحل مختلف حل

در این نوع تحلیل، زمان حل و خروجی‌های مسئله مشخص شد. برای حل مسئله بررسی فشردگی خاک طی آزمایش نشست صفحه‌ای از روش دینامیکی آباکوس/اکسپلیسیت استفاده شد که تحلیل نمونه خاک در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

روش حل آباکوس/اکسپلیسیت در این مطالعه به دلیل تغییر شکل زیاد خاک انتخاب شد. دو Step یا گام تعریف شد. در گام اول کارنده در مدت زمان ۲۰ دقیقه به سمت جلو حرکت می‌کند و سپس به مدت ۳۰ دقیقه ثابت می‌ماند و با نام Loading ایجاد شد؛ سپس گام دوم بانام Unloading به منظور باربرداری ایجاد شد.

۲-۲-۵-۴- تعیین شرایط مرزی و بارگذاری

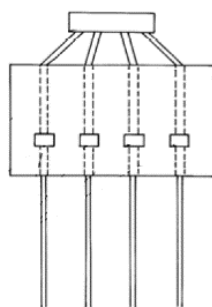
در محیط قرارگیری کارنده در خاک (که پیش‌تر طراحی شده بود)، شرایط مرزی و اولیه تعریف شدند. بارگذاری کارنده به صورت جابه‌جایی به اندازه ۰/۵ متر در جهت روبه‌جلو تعریف شد. برای کارنده سه شرط مرزی در سه گام اولیه، بارگذاری و باربرداری تعریف شد. شرایط مرزی در گام اولیه از نوع Displacement/Rotation که فقط در جهت U2 می‌تواند آزادانه حرکت کند تعریف شد. شرط مرزی برای کارنده که در گام دوم (بارگذاری) تعریف شد، از نوع قبلی بود که حرکت در جهت U2 به اندازه ۰/۵ متر روبه‌جلو تعیین شد. سومین شرط مرزی برای کارنده در گام سوم (باربرداری) از نوع قبلی با حرکت در جهت U2 به اندازه ۲ میلی‌متر رو به بالا تعریف شد. شرط مرزی در دو جهت خاک بر اساس شرایط آزمایشگاهی به این صورت تعریف شد که سطح زیرین خاک از نوع Symmetry/Antisymmetry/Encaster بوده و جابه‌جایی و دوران در همه جهات بسته شد که از Step اولیه این شرط مرزی برقرار بود. دومین شرط مرزی برای مرکز خاک (محور تقارن) از نوع قبلی بود و در جهت Xsymm بسته شد و در بقیه جهات آزاد بود و این شرط هم از Step اولیه برقرار بود.

۲-۲-۵-۵- مش بندی مدل‌های هندسی

از آنجاکه کارنده جسم صلب در نظر گرفته شد، مش بندی آن‌ها صرفاً



شکل ۵- مارکر دیجیتالی
Figure 5. Digital marker



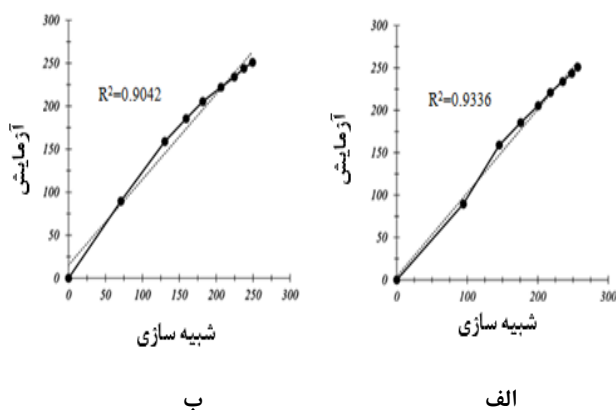
شکل ۶- نقشه کاشت تهیه شده
Fig 6. Prepared planting plan

۳-۴- سنسور سطح سنج

با استفاده از این سنسور به راننده تراکتور میزان پر و خالی بودن مخزن نشان داده شد. این سنسور از اشکال نکاشت ناشی از خالی بودن مخزن را برطرف نمود و امکان پایش لحظه ای حجم مخزن را برای اپراتور فراهم نمود.

۳-۵- مدل سازی

مدل رفتاری دراکر-پراگر (شکل ۷ الف) نسبت به مدل موهر-کولمب (شکل ۷ ب) با ضریب تبیین ۹۳٪ تطبیق مناسبی با داده های آزمایش داشت.



شکل ۷- الف- ضریب تبیین الف- مدل دراکر-پراگر ب- مدل موهر-کولمب

Fig 7. Coefficient of explanation A- Drucker-Prager model B- Mohr-Coulomb model

۳-۲- مشخصات فنی

یکی از نیازهای اساسی مدیریت مؤثر ماشین آلات، شناسایی اجزای اصلی آن است. این آشنایی باعث می شود مدیران مزرعه، بهترین انتخاب را از نظر تهیه ماشین کاشت داشته باشند و در طول کاشت از ماشین خود به صورت بهینه استفاده نمایند (Karthikeyam *et al.*, 2017). مشخصات فنی لازم برای به کارگیری دستگاه و انجام سایر تست های مزرعه ای در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- مشخصات فنی

Table 4. Technical specifications

مدل 1506 (Model 1561)	ویژگی (exclusivity)
175	عرض کل (سانتی متر) (Total width (cm))
150	عرض کار مفید (سانتی متر) (Useful working width (cm))
25	فاصله بین ردیف های کاشت (سانتی متر) (Distance between planting rows (cm))
150	حجم مخزن بذر و کود (لیتر) (The volume of the seed and fertilizer tank (lit))
860	وزن کل (کیلوگرم) (Total weight (kg))
1750×1860×1665	ابعاد دستگاه (میلی متر) (Device dimensions (mm))
75-95	توان مورد نیاز (اسب بخار) (required power (hp))

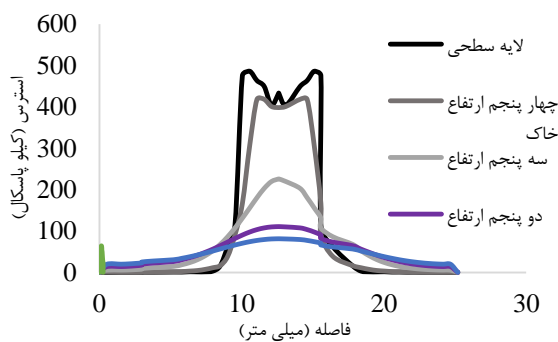
۳-۳- مارکر

برای جلوگیری از عدم استفاده از مارکر مکانیکی در این ماشین از دوربین دیجیتالی شکل ۵ استفاده شد. این دوربین با استفاده از سنسور جی پی اس تعبیه شده بر روی شاسی نقشه حرکت تراکتور در سطح مزرعه را تهیه و به راننده تراکتور نشان می دهد (شکل ۶). از فواید استفاده از ردیاب جی پی اس در زمینه نقشه کشی زمین است که نقشه برداری از زمین باعث می شود از میزان مسافت زمین مطلع بود، محل حرکت ماشین کشاورزی را ردیابی نمود و به صورت دقیق طول و عرض زمین کشاورزی خود را محاسبه نمود. استفاده از پودر رنگی که به تازگی در اکثر ماشین های کشاورزی مشاهده می شود به دلیل حرکت چرخ تراکتور و وزش باد امکان پاک شدن آن وجود دارد از نظر کارشناسان این حوزه روش علمی برای انجام این کار نیست. این مارکر مشکلات شکستگی متعدد مارکر مکانیکی را ندارد. در گذشته کشاورزان به دلیل تنظیمات سخت مارکر آن را از روی دستگاه خود حذف کرده و یا استفاده نمی نمودند؛ در این مدل این مشکلات برطرف گردید.

همچنین (Khodaei *et al.*, 2016) در تحقیق خود تحت عنوان آنالیز الاستیک و آنالیز الاستوپلاستیک توزیع تنش در خاک به این نتیجه رسید که با افزایش عمق توزیع تنش کاهش می‌یابد.

۳-۷- توزیع تنش در عرض

در اعمال بارمحوری به خاک، نحوه توزیع تنش در عرض خاک تحت بارگذاری زیر صفحه بارگذاری و اطراف آن است. در هنگام بارگذاری به خاطر ایجاد تمرکز تنش در اطراف عامل بارگذاری، توزیع تنش نامتوازن است و این امر باعث ایجاد تراکم در خاک در زیر سطح بارگذاری و اطراف محل بارگذاری می‌شود. نتایج حاصل از توزیع تنش در عرض خاک در شکل ۹ نشان داده شده است.



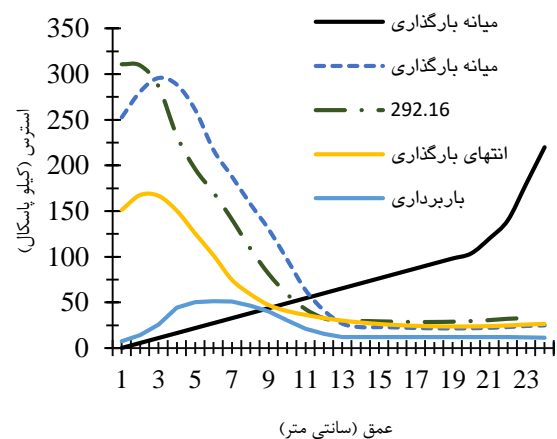
شکل ۹- نحوه توزیع تنش در عرض تحت بارمحوری در آزمون نشست صفحه‌ای با مدل دراگر- پراگر

Fig 9. The distribution of stress across the width under axial load in the plate settlement test with the Drucker-Prager model

نتایج این تحقیق در زمینه توزیع تنش در عمق با نتایجی که توسط (Mardani *et al.*, 2018) در تحقیق تحلیل اجزاء محدود برهم‌کنش چرخ محرک-خاک که برای برآورد توزیع تنش عمودی خاک انجام شده بود در مقایسه تغییرات تنش عمودی خاک در عمق‌های مختلف در آزمون‌های عددی و تجربی هم‌خوانی دارد. انتشار حساب‌وار سبب کاهش تنش وارده بر لایه‌های زیرین خاک می‌گردد. نتایج این تحقیق نشان داد کاهش تنش در عمق‌های زیرین خاک در آزمون نشست صفحه‌ای اتفاق نیفتاده است و تنش باقی‌مانده است. در نتایجی که از نمودار توزیع تنش در عمق از آزمون نشست صفحه‌ای (شکل ۹) حاصل شد مشخص گردید کاهش تنش تا لایه‌های زیرین خاک اتفاق افتاده و تقریباً به صفر رسیده است؛ که این اختلاف تنش را می‌توان این‌گونه بیان کرد که هرچه از محل اثر بار فاصله گرفته شود مشاهده می‌شود تنش در آزمون نشست صفحه‌ای کم شده به دلیل این‌که مساحت صفحه بارگذاری کم‌تر بوده و کناره‌های سطح خاک آزاد هستند و ذرات خاک آزادانه اجازه حرکت و جابه‌جایی دارند.

۳-۶- توزیع تنش فشاری

در صورت دانستن مقدار تنش در عمق‌های مختلف خاک تحت عامل بارگذاری، میزان تراکم خاک قابل تخمین است. در اینجا با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری تنش در دانشگاه بوعلی سینا همدان، توزیع تنش در عمق با استفاده از مدل اجزاء محدود ارائه شده، شبیه‌سازی شد. نتایج توزیع تنش فشاری در لایه‌های خاک نشان داد که در آزمون نشست صفحه‌ای بیشترین مقدار تنش در نوک تیغه کارنده و اطراف آن بوده و در کناره‌های خاک تنش تقریباً صفر است. در آزمون نشست صفحه‌ای ذرات خاک در کناره‌ها می‌توانند آزادانه حرکت کنند ولی در سایر آزمون‌ها به علت این‌که خاک محصور است و ذرات خاک اجازه جابه‌جایی ندارند، تنش ناشی از بار اعمالی به ذرات خاک آزاد نمی‌شود و در خاک، باقی‌مانده تراکم تمام لایه‌های خاک را در برمی‌گیرد (Ucgul & Saunders, 2020). نتایج حاصل از توزیع تنش در راستای محور عمودی خاک با استفاده از مدل دراگر-پراگر در شکل ۸ آورده شده است.



شکل ۸- توزیع تنش در عمق تحت تأثیر بارمحوری حاصل از مدل اجزاء محدود در آزمایش نشست صفحه‌ای با معیار تسلیم دراگر- پراگر

Fig 8. Stress distribution in depth under the influence of axial load resulting from finite element model in plate settlement test with Drucker-Prager yield criterion

همان‌طور که از نتایج شکل‌های ۱۵ مشاهده می‌شود هرچه از محل مقدار بارمحوری وارد شده دورتر می‌شویم مقدار تنش قائم در سطح خاک کاهش می‌یابد و کشیدگی نمودار روی محور افقی مختصات تنش کاهش می‌یابد و به محور عمودی مختصات نزدیک می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با وارد شدن بارمحوری در خاک تنش افزایش یافته ولی با افزایش عمق تنش در خاک کاهش یافته است (Habibi *et al.*, 2017) نیز بیان نمودند که با قرار گرفتن سربار بر روی خاک به مقدار تنش موجود در خاک افزوده می‌شود و هر چه در جهت افقی و قائم از محل اثر بار فاصله گرفته شود مشاهده می‌شود که از تأثیر سربار کم می‌شود.

با افزایش عمق تنش در خاک کاهش یافته هرچه در جهت قائم از محل اثر بار فاصله گرفته شود مشاهده می شود تنش کم شده و ثابت شده ولی این کاهش تنش در عمق های زیرین خاک اتفاق نیفتاده است و تنش باقی مانده است. در نتایجی که از نمودار توزیع تنش در عمق از آزمون نشست صفحه ای حاصل شد مشخص گردید کاهش تنش تا لایه های زیرین خاک اتفاق افتاده و تقریباً به صفر رسیده است؛ که این اختلاف تنش را می توان این گونه بیان کرد که در آزمایش نشست صفحه ای به دلیل این که سطح بارگذاری کم تر بوده و کناره های سطح خاک آزاد بوده و ذرات اجازه جابه جایی داشتند با دانستن مقدار تنش در هر نقطه از خاک در محدوده بارگذاری، مقدار اثر بار وارده بر خاک مشخص می گردد. استفاده از سیستم مارکر دیجیتالی و مانیتورینگ میزان نکاشت را کاهش داد و تهیه نقشه کاشت استفاده از تمام ظرفیت زمین را افزایش داد. در مجموع با نتایج و روابط حاصل از پژوهش امکان پایش عملیات کاشت و دریافت بازخورد از عدم کارکرد صحیح ماشین در مزارع کشاورزی میسر شد. نتایج و ضرایب تعیین آزمون مزرعه ای نسبت به نتایج آزمایشگاهی ضعیف تر بود. این نتیجه ناشی از غبارآلود شدن عدسی دوربین ها در نتیجه کار در شرایط گردو خاکی مزرعه است. این غبار بیشترین تأثیر منفی را بر عملکرد سامانه پایش پیشنهادی داشت.

در نهایت دستگاه با گواهی ثبت اختراع ۱۰۶۱۵۰ و طبقه بندی بین المللی A01C5/00 در اداره مالکیت معنوی (اداره اختراعات) ثبت شد.

منابع

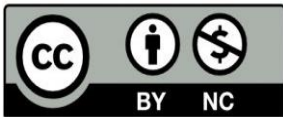
- Alexandrou, A., and Earl, R. (1995). *In situ determination of the pre-compaction stress of a soil*. Journal of Agricultural Engineering Research, 61(1): 67-71.
- Conte, O., Levien, R., Debiassi, H., Sturmer, S.L.K., Mazurana, M., and Muller, J. (2011). *Soil disturbance index as an indicator of seed drill efficiency in no-tillage agro systems*. Soil and Tillage Research, 114: 37-42.
- Failla, S., Pirchio, M., Sportelli, M., Frascioni, C., Fontanelli, M., Raffaelli, M., and Peruzzi, A. (2021). *Evolution of Smart Strategies and Machines Used for Conservative Management of Herbaceous and Horticultural Crops in the Mediterranean Basin*. A Review. Agronomy, 11(1): 106.
- Goldman, D.M., Hunter, J.L., and Meyer, T.P. (2013). *Seed planter data acquisition and management system*. Pioneer Hi Bred International Inc U.S. Patent 8: 473,168.
- Gregory, A.S., Whalley, W.R., Watts, C.W., Bird, N.R.A., Hallett, P.D., and Whitmore, A. P. (2006). *Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data*. Soil and Tillage Research, 89(1): 45-57.
- Habibi, B., Zamanianjani, m., and Parvizi, I. (2017). *Analytical study and comparison of vertical stress distribution under loading of some cases located at the soil surface and depth*. International Civil Conference, Architecture and Urban Development Management in Iran. University of Tehran.
- Hambleton, J.P., and Drescher, A. (2009). *On modeling a*

۴- نتیجه گیری نهایی

هدف از این پژوهش بررسی رفتار خاک طی عملیات فشردگی و ارزیابی آن با مدل های تحلیل گسیختگی به روش اجزاء محدود در سطح رطوبتی ۵d.b درصد بود؛ که مشخص گردید هر دو مدل دراکر-پراگر و موهر-کولمب مطابقت خوبی با نتایج آزمایش های تجربی داشتند که دقت مدل دراکر-پراگر بالاتر بود. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار بارگذاری روی سطح خاک میزان تنش و نشست خاک افزایش یافت و مقدار تنش در لایه های عمیق تر خاک بیش تر شد. مقدار تنش و جابجایی در لایه های نزدیک به سطح بارگذاری بیشتر و با حرکت به سمت لایه های پایین تر مقدار تنش و جابجایی کاهش می یابد. نتایج شبیه سازی آزمون فشردگی محصور و نشست صفحه ای توأم با هم نتایج نشان داد با افزایش عمق از مقدار مشخصی مقدار تنش در خاک کاهش یافت و در لایه های زیرین خاک، مقدار تنش ثابت شده و تنش باقی مانده است. شکل توزیع تنش در خاک تحت شرایط بارگذاری و شرایط خاک است. هر چه سطح تماس اعمال بار محوری کوچک تر باشد، تنش بیشتری در خاک ایجاد شده و شکل توزیع تنش سهمی است. در صورت افزایش سطح تماس، شکل توزیع تنش به صورت U شکل خواهد بود. بررسی تغییرات تنش عمودی خاک در عمق های مختلف نشان داد که در هر دو آزمون عددی و تجربی در ترکیب های مختلف بار عمودی و سرعت پیشروی، با افزایش عمق، تنش عمودی خاک با پیروی از یک الگوی توانی کاهش یافته است. با توجه به نتایج

- rolling wheel in the presence of plastic deformation as a three-or two-dimensional process*. International Journal of Mechanical Sciences, 51(11-12): 846-855.
- Karimi, H., Navid, H., and evangelist, B. (2020). *Design and construction of linear performance monitoring system*. Agricultural Engineering (Scientific Journal of Agriculture), 43(2): 86-70.
- Karthikeyam, K., Sundar, S.S., Subramaniam, C.S., and Sivakumar, P.S. (2017). *Design and development of a multi-utility agricultural vehicle*. In 2017 IEEE Technological Innovations in ICT for Agriculture and Rural Development (TIAR), 12: 109-111. IEEE.
- Khodaei, M., Fattahi, S.F., and Navid, H. (2016). *Evaluation of FEM modelling for stress propagation under pressure wheel of corn planter*. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 18(3): 14-22.
- Mardani, A., Dibagar, N., and Modaresmotlagh, A. (2018). *Finite element analysis of drive-soil wheel interaction to estimate vertical soil stress distribution*. Agricultural Engineering, 39: 113-125.
- Mizuno, E., and Chen, W.F. (1983). *Cap models for clay strata to footing loads*. Computers and Structures, 17(4): 511-528.
- Munar, B.Z., Estigoy, M.A., and Vargas, D. (2021). *Awareness level on farm Machinery among Rice Farmers*. Available at SSRN 4: 304-325.

- Naderi-Boldaji, M., Hajian, A., Ghanbarian, D., and Bahrami, M. (2018). *Finite element simulation of plate sinkage, confined and semi-confined compression tests: A comparison of the response to yield stress*. Soil and Tillage Research, 179: 63–70.
- Rakhra, M., and Singh, R. (2021). *A study of machinery and equipment used by farmers to develop an uberized model for renting and sharing*. Materials Today: Proceedings, 25: 63–72.
- Sartas, M. (2021). *Scaling Readiness Innovation Profile of Mechanized Raised (Seed) bed Technology in Egypt for improving incomes of small scale farmers*.
- Sivarajan, S., Maharlooei, M., Bajwa, S.G., and Nowatzki, J., (2018). *Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield*. Soil and Tillage Research, 175: 234–243.
- Soloviev, S.V., Abrosimov, A.G., Dyachkov, S.V., Bakharev, A.A., Kartechina, N.V., and Zavrazhnov, A.A. (2021). *Theoretical substantiation of the design of the opener of the beet seeder*. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 677, No. 4: 042-114). IOP Publishing.
- Ucgul, M., and Saunders, C. (2020). *Simulation of tillage forces and furrow profile during soil-mouldboard plough interaction using discrete element modelling*. Biosystems Engineering, 190: 58–70.



This is an open access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)