

Prediction and optimization of the draft force and soil fragmentation by rotary plow using the response surface methodology

Amir Hossein Yavari¹, Seyyed Reza Mousavi Seyyedi², Mohammad Askari^{*3},
Ramzan Hadipour Rokni⁴

1. M.Sc. Graduate of Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran. E-mail: shahryaryavari1@gmail.com
2. Associate Prof., Dept. of Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran. E-mail: mousavi22@sanru.ac.ir
3. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: m.askari@sanru.ac.ir
4. Educational Group Expert, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: r.hadipour@sanru.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 04.21.2024
Revised: 06.23.2024
Accepted: 08.10.2024

Keywords:

Clods mean weight diameter,
Draft force,
Rotary tiller,
Soil fragmentation,
Tillage

ABSTRACT

Background and Objectives: The size of the clods is of great importance in terms of tillage quality, soil protection, and erosion prevention, along with the amount of energy consumption in seedbed preparation. The purpose of this study is to measure the draft force required by the rotary plow and mean weight diameter (MWD) due to the independent variables of the forward speed, the rotational speed and the plow cover position in field conditions and training the design expert software of the response surface methodology (RSM) section to predict the unmeasured values and optimize the output variables in order to reduce soil erosion.

Materials and Methods: Field experiments were conducted in the form of a randomized complete block design (RCBD) with three replications. Each block was divided into 27 plots with a width of 3 meters and a length of 20 meters. The effect of three input variables, including the rotational speed at three levels (150, 200 and 250 rpm), the forward speed of the tractor at three levels (3, 4 and 5 km/h) and the position of the cover at three levels (top, middle and bottom) on the draft force required by the rotary plow and the MWD of soil as dependent variables. The draft force was measured based on the two-tractor test method and the MWD of the soil was measured using sieves with 10, 4, 2.36, 1.4, 1, and 0.5 and 0.18 mm meshes.

Results: The results showed that the effect of forward speed, rotational speed of the plow and the cover position on the draft force and soil fragmentation are significant. The cover position had the greatest effect on the draft force and soil fragmentation. As the bottom position of cover and the forward speed and rotational speed of the plow were adjusted high, the draft force increased. In addition, the bottom position of the cover, reducing the tractor speed and increasing the rotational speed of the plow, greatly increased the fragmentation and, as a result, the high soil erosion. The highest draft force in the bottom cover position, the forward speed of 5 km/h and the rotational speed of 250 rpm is 657 newtons and the lowest MWD of soil grains in the state of the low cap, the forward speed of 3 km/h and rotational speed of 250 rpm was obtained by 5 mm. Also, the

results showed that the response surface methodology has a high ability to model the draft force of rotary plow ($R^2=0.96$) and soil fragmentation ($R^2=0.99$).

Conclusion: In the studied range, the position of the plow cover had the most significant effect on the draft force and soil fragmentation. The results of the simultaneous optimization of the draft force of 600 newtons and the MWD of 7.5 mm introduced nine solutions in the studied range, and the best solution represents the optimal point at the forward speed of 4.82 km/hr, the bottom cover position and the rotational speed of 170.2 rpm with a satisfaction of 0.979.

Cite this article: Yavari, Amir Hossein, Mousavi Seyyedi, Seyyed Reza, Askari, Mohammad, Hadipour Rokni, Ramzan. 2024. Prediction and optimization of the draft force and soil fragmentation by rotary plow using the response surface methodology. *Journal of Water and Soil Conservation*, 31 (3), 109-131.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2024.22374.3724

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

پیش‌بینی و بهینه‌سازی نیروی کشش و خردشدگی خاک توسط گاواهن دوار به کمک روش سطح پاسخ

امیرحسین یاوری^۱، سیدرضا موسوی سیدی^۲، محمد عسکری^{۳*}، رمضان هادی‌پور رکنی^۴

۱. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: shahryaryavari1@gmail.com
۲. دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: mousavi22@sanru.ac.ir
۳. نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: m.askari@sanru.ac.ir
۴. کارشناس گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: r.hadipour@sanru.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: اندازه کلوخه‌ها از نظر کیفیت خاک‌ورزی و حفاظت از خاک و جلوگیری از فرسایش به همراه میزان مصرف انرژی در آماده‌سازی بستر بذر از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند. هدف از این مطالعه اندازه‌گیری نیروی کششی موردنیاز گاواهن دوار و میزان خردشدگی خاک در اثر متغیرهای سرعت پیشروی، سرعت دورانی محور گردنده و وضعیت درپوش گاواهن در شرایط مزرعه‌ای به‌منظور پیش‌بینی مقادیر اندازه‌گیری نشده و بهینه‌سازی متغیرهای خروجی جهت کاهش فرسایش خاک است.
تاریخ دریافت: ۰۳/۰۲/۰۲ تاریخ ویرایش: ۰۳/۰۴/۰۳ تاریخ پذیرش: ۰۳/۰۵/۲۰	مواد و روش‌ها: آزمایش‌های مزرعه‌ای در قالب طرح بلوک کامل تصادفی به‌صورت فاکتوریل با ۳ تکرار انجام گرفت. هر بلوک به ۲۷ کرت به عرض ۳ متر و طول ۲۰ متر تقسیم شد. اثر سه متغیر در ورودی شامل سرعت دورانی گاواهن دوار در سه سطح (۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ دور بر دقیقه)، سرعت پیشروی تراکتور در سه سطح (۳، ۴ و ۵ کیلومتر بر ساعت) و وضعیت قرارگیری درپوش در سه سطح (بالا، وسط و پایین) بر نیروی کششی موردنیاز گاواهن و میانگین قطر وزنی ذرات خاک به‌عنوان متغیر وابسته بررسی شد. نیروی کشش براساس روش دو تراکتوری اندازه‌گیری شد و میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها با استفاده از الک‌های با مش‌بندی ۱۰، ۴، ۲/۳۶، ۱/۴، ۱/۵، ۰/۵ و ۰/۱۸ میلی‌متر اندازه‌گیری شد.
واژه‌های کلیدی: خاک‌ورزی، خاک همزن، خردشدگی خاک، میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها، نیروی کششی	

یافته‌ها: نتایج نشان داده است که اثر سرعت پیشروی، سرعت دورانی گاواهن و وضعیت درپوش بر نیروی کشش و خردشدگی خاک معنی‌دار می‌باشد. وضعیت درپوش بیش‌ترین تأثیر را بر نیروی کشش و خردشدگی خاک داشته است. هرچه درپوش پایین‌تر و سرعت پیشروی و سرعت دورانی محور گردنده بیش‌تر تنظیم شدند، نیروی کشش افزایش یافته است. به‌علاوه، پایین بودن درپوش، کاهش سرعت پیشروی تراکتور و افزایش سرعت دورانی گاواهن، خردشدگی و در نتیجه فرسایش خاک را به‌شدت افزایش داده است. بیش‌ترین نیروی کشش در وضعیت درپوش پایین، سرعت پیشروی ۵ کیلومتر بر ساعت و سرعت دورانی ۲۵۰ دور بر دقیقه به میزان ۶۵۷ نیوتن به‌دست آمده است. کم‌ترین میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها در وضعیت درپوش پایین، سرعت پیشروی ۳ کیلومتر بر ساعت و سرعت دورانی ۲۵۰ دور بر دقیقه به میزان ۵ میلی‌متر به دست آمده است. هم‌چنین نتایج نشان داده است که روش منحنی سطح پاسخ توانایی بالایی در مدل‌سازی نیروی کشش گاواهن دوار (ضریب تبیین=۰/۹۶) و خردشدگی خاک (ضریب تبیین=۰/۹۹) دارد.

نتیجه‌گیری: در محدوده مورد مطالعه، وضعیت قرارگیری درپوش گاواهن بیش‌ترین تأثیر را بر نیروی کشش و خردشدگی خاک داشت. نتایج حاصل از بهینه‌یابی هم‌زمان نیروی کشش ۶۰۰ نیوتن و میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها ۷/۵ میلی‌متر، ۹ راه‌حل را در محدوده مورد مطالعه معرفی کرد که بهترین راه‌حل بیانگر نقطه بهینه در سرعت پیشروی ۴/۸۲ کیلومتر بر ساعت، وضعیت درپوش پایین و سرعت دورانی ۱۷۰/۲ دور بر دقیقه با رضایتمندی ۰/۹۷۹ می‌باشد.

استناد: یآوری، امیرحسین، موسوی سیدی، سیدرضا، عسکری، محمد، هادی‌پور رکنی، رمضان (۱۴۰۳). پیش‌بینی و بهینه‌سازی نیروی کشش و خردشدگی خاک توسط گاواهن دوار به کمک روش سطح پاسخ. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۱ (۳)، ۱۳۱-۱۰۹.

DOI: 10.22069/jwsc.2024.22374.3724



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

یکی از عوامل تأثیرگذار بر روی رشد گیاه و تولید محصول، شرایط بهینه خاک است. انجام و اجرای عملیات حداقل دست‌کاری مکانیکی خاک با اولویت بی خاک‌ورزی به‌طور دقیق، استفاده بجا و مناسب از ماشین‌های خاک‌ورزی از تخریب خاک جلوگیری می‌کند (۱). اندازه کلوخه‌ها از نظر کیفیت خاک‌ورزی و میزان مصرف انرژی در آماده‌سازی بستر بذری از اهمیت بالایی برخوردار است (۲). به‌طورکلی پیاده‌سازی عملیات خاک‌ورزی همیشه به انرژی زیادی نیاز دارد که در بیشتر موارد این میزان از پنجاه درصد کل انرژی صرف شده برای آماده‌سازی زمین نیز افزون‌تر است (۳)؛ بنابراین موضوع خاک‌ورزی از دو جهت از اهمیت شایانی برخوردار است؛ در درجه اول تأثیری که بر رشد گیاه و عملکرد محصول و فرسایش خاک دارد و در درجه دوم تأثیری که بر مصرف انرژی دارد و همیشه موردتوجه متخصصین است (۴). از سوی دیگر عبور ماشین‌های کشاورزی سنگین باعث ایجاد تراکم در لایه‌های زیرین خاک شده که به‌مرور زمان به مشکلی جدی برای رشد ریشه و زهکشی آب منجر می‌شود؛ بنابراین پژوهش‌گران در سال‌های اخیر به دنبال روش‌های خاک‌ورزی بوده‌اند که با کم‌ترین عبور، ساختار خاک آماده رشد گیاه گردد (۵).

در مدیریت خاک و تولید محصول تلاش می‌شود ادوات و ابزاری که در رابطه با خاک به کار می‌روند، به‌گونه‌ای طراحی شوند که از پیامدهای تخریب خاک و هدر رفتن انرژی جلوگیری کنند (۶). امروزه طراحان و سازندگان ماشین‌های کشاورزی در سراسر دنیا پیگیر بهینه‌سازی ادوات به‌منظور روش‌های مناسب برای کاهش مصرف سوخت و نیروی کششی و کاهش کلوخه‌ها و جلوگیری از فرسایش خاک می‌باشند؛ بنابراین طراحی ادوات خاک‌ورزی و

چگونگی تأثیر آن بر پارامترهای مختلفی از جمله نیروی کششی و میزان سوخت مصرفی و شرایط تأثیرگذاری روی فیزیک خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (۷).

به‌تازگی ادوات خاک‌ورزی مرکب اهمیت بسیاری یافته‌اند. این ادوات یا ابزارها ترکیبی از چند ابزار خاک‌ورزی بوده و با یک‌بار عبور، دو یا چند عملیات خاک‌ورزی را انجام داده و در زمان و هزینه و سوخت بسیار صرفه‌جویی خواهند نمود (۸). مهم‌ترین ماشین‌های خاک‌ورزی که در ترکیب با سایر ماشین‌های خاک‌ورزی در یک ماشین مرکب خاک‌ورزی به‌کار می‌رود، گاوآهن دوار (رتیواتور) است. از طرفی، میزان خردشدگی خاک یکی از پارامترهای مهم نحوه کارکرد ادوات خاک‌ورزی است و می‌تواند در طراحی و بهینه‌سازی ادوات مؤثر باشد. بنابراین افزایش دقت و انجام آن موردتوجه بسیاری از پژوهش‌گران بوده است (۹).

در پژوهشی تأثیر سرعت پیشروی و سرعت دورانی محور گردنده بر عملکرد گاوآهن دوار موردبررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که میزان خرد شدن خاک تحت تأثیر تغییرات سرعت پیشروی و سرعت دورانی محور گردنده قرار دارد. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که ترکیب بهینه عوامل سرعت پیشروی و سرعت دورانی محور برای درصد خرد شدن خاک 0.72 کیلومتر در ساعت و 110 دور در دقیقه است که باعث شد ذراتی با اندازه کم‌تر از 40 میلی‌متر ایجاد شوند (۱۰).

تأثیر سه عامل عمق شخم، سرعت پیشروی تراکتور و وضعیت درپوش بر کیفیت شخم در پژوهشی موردبررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که کاهش سرعت پیشروی و پایین بودن درپوش، کیفیت شخم و خردشدگی خاک را بهبود بخشید و مناسب‌ترین ترکیب برای بهبود کیفیت شخم

هدف از مطالعه حاضر، اندازه‌گیری نیروی کشش موردنیاز و میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها (خردشدگی خاک) در اثر متغیرهای ورودی سرعت پیشروی تراکتور، سرعت دوران و وضعیت درپوش گاوآهن دوار در شرایط مزرعه‌ای و استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) به منظور پیش‌بینی مقادیر اندازه‌گیری نشده و بهینه‌سازی متغیرهای خروجی به صورت ایدئال با بالاترین رضایتمندی جهت کنترل فرسایش خاک می‌باشد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در مزارع تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به عرض جغرافیایی ۵۳ درجه و ۱۰ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۲ دقیقه شرقی و میانگین ارتفاعی ۱۶ متر از سطح دریای آزاد با بافت خاک رسی سیلتی (۴۳ درصد سیلت، ۱۰ درصد شن، ۴۷ درصد رس) انجام شد. محصول قبلی کشت‌شده در مزرعه کلزا بود و قبل از اجرای آزمایش‌ها، تمامی بقایای به‌جا مانده از مرحله برداشت مانند ساقه‌های ریزشده محصول قبلی به کمک دستگاه مکنده از سطح مزرعه حذف و سایر بقایا حفظ شد. ۳ بلوک (تکرار) هر یک به عرض ۲۷ و طول ۶۰ متر اختصاص داده شد. به منظور اجرای آزمایش‌های مربوط به ۸۱ تیمار تحت بررسی، هر بلوک به ۲۷ کرت به عرض ۳ متر و طول ۲۰ متر تقسیم شد. به منظور تعیین محتوای رطوبتی خاک از هر کرت در سه عمق ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر سه نمونه تهیه شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در کوره با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار گرفتند و با استفاده از رابطه ۱ مقدار رطوبت خاک بر پایه وزن خشک تعیین شد (۱۴):

$$M.C = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100 \quad (1)$$

در کم‌ترین سرعت به میزان ۲/۱۳ کیلومتر بر ساعت و وضعیت درپوش پایین به دست آمد (۱۱).

در پژوهشی دیگر، عملکرد کششی و خردشدگی خاک بعد از عبور رتیواتور و هرس دورانی با یکدیگر مقایسه شد. نتایج این پژوهش نشان داد که نیروی کششی موردنیاز رتیواتور و هرس دورانی به ترتیب ۴/۳۱ و ۱/۹۸ کیلونیوتن بود. هم‌چنین هردوی این ادوات دارای کشش منفی به میزان ۱/۱ درصد برای رتیواتور و ۲/۴ درصد برای هرس دورانی بودند. هم‌چنین نتایج این پژوهش نشان داد که در خاک‌های سفت، رتیواتور کلوخه‌های ریزتری ایجاد می‌کند اما در خاک‌های که توسط زیرشکن شخم خورده‌اند، هرس دوار کلوخه ریزتر ایجاد می‌کند (۱۲).

نکته مهم در رابطه با خردشدگی خاک این است که فراهم نمودن خردشدگی ایدئال ممکن است به قیمت مصرف انرژی زیادی انجام گیرد، بنابراین باید به دنبال روش‌هایی بود تا شرایط بهینه برای خردشدگی و مصرف انرژی را پیش‌بینی کند. در گذشته، میزان کلوخه‌های باقی‌مانده در مزرعه با استفاده از مدل‌های ریاضی تعیین می‌شد. در سال‌های اخیر، روش‌های مختلفی از جمله روش‌های یادگیری ماشین، شبکه عصبی و فازی و روش سطح پاسخ، مورد استفاده قرار گرفت. روش سطح پاسخ، مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی است که رابطه بین یک یا چند متغیر پاسخ را با چندین متغیر مستقل تعیین می‌کند این روش در سال ۱۹۵۱ توسط باکس و ویلسون معرفی شد و تا به امروز نیز از آن به‌عنوان یکی از ابزارهای طراحی آزمایش استفاده می‌گردد. هرچند بسیاری این روش را به‌عنوان یک شبه مدل (Metamodel) می‌دانند، مطالعاتی مانند مطالعه کرمی و همکاران (۲۰۱۹)، روش سطح پاسخ را به‌عنوان یک روش قابل قبول در مقایسه با روش‌های سنتی مدل‌سازی نشان داده است (۱۳).

است. به‌منظور افزایش دقت اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه در هر کرت ۱۰ اندازه‌گیری برای اعماق ۰-۱۰، ۱۰-۲۰ و ۲۰-۳۰ سانتی‌متر و برای هر عمق ۳۶ نمونه‌برداری انجام شد. این خصوصیات توسط روش‌های استاندارد در آزمایشگاه گروه علوم خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری تعیین شدند (جدول ۱).

که در آن، M.C درصد رطوبت خاک (بر پایه خاک خشک)، W_w جرم خاک مرطوب (گرم)، W_d جرم خاک خشک (گرم).

برای تعیین مقاومت به نفوذ خاک در ۵۰ نقطه تصادفی از کل مزرعه از نفوذسنج مخروطی عقربه‌ای ویکس برگ (حلقوی) استفاده شد (۱۵ و ۱۶). نتایج این بخش به صورت میانگین در شکل ۱- الف آمده

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه تحقیقاتی.

Table 1. Physical properties of research field soil.

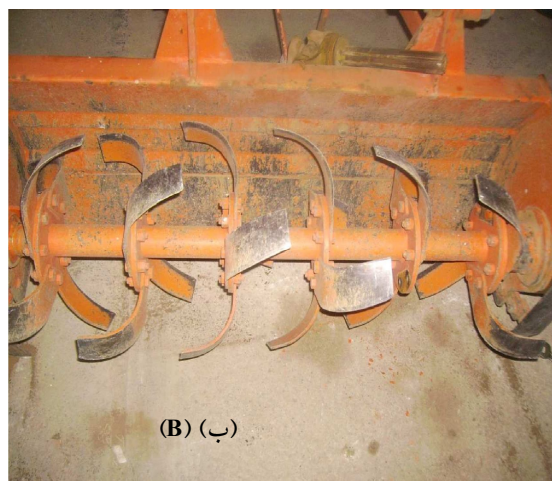
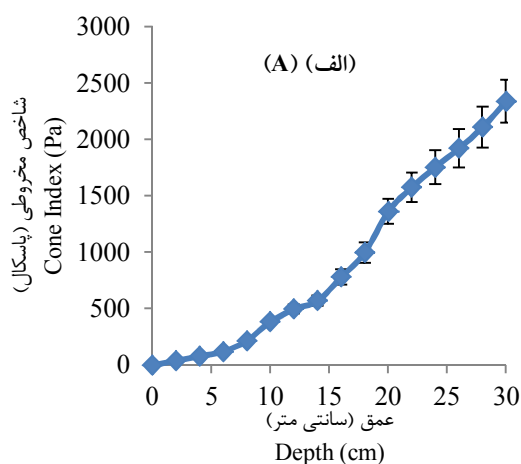
مقدار Amount	متغیر Property
0.29	ماده آلی (درصد) (Organic Matter%)
25.76	حد خمیری (Plastic Limit)
39.81	حد روانی (Liquid Limit)
14.05	شاخص خمیری (Plastic Index)
13.10	ظرفیت مزرعه‌ای بر پایه وزن خشک (درصد) (Field Capacity (db) %)
1190	چگالی ظاهری خاک (کیلوگرم بر مترمکعب) (۱۵-۰ سانتی‌متری) (Bulk Density (kg/m ³) 0-15 cm)
1210	چگالی ظاهری خاک (کیلوگرم بر مترمکعب) (۳۰-۱۵ سانتی‌متری) (Bulk Density (kg/m ³) 15-30 cm)
4.3	رطوبت بر پایه وزن خشک (درصد) (۱۵-۰ سانتی‌متری) (Moisture Content (db) % 0-15 cm)
8.4	رطوبت بر پایه وزن خشک (درصد) (۳۰-۱۵ سانتی‌متری) (Moisture Content (db) % 15-30 cm)

فاکتوریل با سه تکرار انجام گرفت. در آزمون‌ها تأثیر سه متغیر ورودی شامل سرعت دورانی گاواهن دوار در سه سطح (۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ دور بر دقیقه)، سرعت پیشروی تراکتور در سه سطح (۳، ۴ و ۵ کیلومتر بر ساعت) و وضعیت قرارگیری درپوش در سه سطح (بالا، وسط و پایین به ترتیب کمیتی‌سازی شده با اعداد ۱، ۲ و ۳ در مدل‌سازی) بر نیروی کشش مورد نیاز گاواهن دوار و میانگین قطر وزنی ذرات خاک که بیانگر خردشدگی خاک بود به عنوان متغیرهای خروجی بررسی شد. گاواهن دوار استفاده شده در پژوهش حاضر دارای عرض کار ۲۰۰ سانتی‌متر بود. بر روی محور گردنده دستگاه، ۶ فلانژ

برای انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای از دو تراکتور آروید-۳۵۴ (۳۵ اسب بخار- دو دیفرانسیل) و مسی فرگوسن ۲۸۵ (۷۵ اسب بخار- تک دیفرانسیل) استفاده شد. از تراکتور آروید ۳۵۴ به‌منظور تأمین گشتاور لازم برای به حرکت درآوردن محور گردنده گاواهن دوار استفاده شد. هم‌چنین از تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ برای تأمین نیروی لازم جهت حرکت تراکتور آروید ۳۵۴ استفاده شد. از دو تراکتور در این پژوهش استفاده شد تا بتوان نیروی کششی مورد نیاز ماشین خاک‌ورز را با روش کشش دو تراکتوری (RNAM) اندازه‌گیری کرد. آزمایش‌ها به‌صورت مزرعه‌ای در قالب طرح بلوک کامل تصادفی به‌صورت

و پایین هم‌چنین وضعیت‌های بینابینی وجود داشت. حالت قرار گرفتن این درپوش بر میزان خردشدگی و اندازه ذرات خاک تأثیرگذار است.

و بر روی هر فلائز ۴ تیغه C شکل قرار داشت (شکل ۱-ب). این گاواهن دارای درپوش قابل تنظیم در قسمت عقب بود که به وسیله زنجیر امکان تغییر وضعیت قرارگیری آن در ۳ وضعیت اصلی بالا، وسط



شکل ۱- الف) نتایج آزمون نفوذسنجی و ب) گاواهن مورد استفاده در پژوهش حاضر.
Figure 1. (A) Penetrometry test results and (B) Rotary plow used in the study.

(لودسل) مالبندی S شکل، نمایش داده شده است. نیروسنج مذکور از نوع نیروسنج‌های مالبندی مبتنی بر کرنش‌سنج است که به‌منظور اندازه‌گیری نیرو از تغییرات مقاومت الکتریکی چهار کرنش‌سنج در یک مدار پل وتسون به‌عنوان عنصر حساس به نیرو استفاده می‌کند. ظرفیت تحمل این نیروسنج معادل نیرویی حدود ۱۰۰ کیلونیوتن بود.

برای اندازه‌گیری سرعت پیشروی تراکتور، دور موتور با استفاده از گاز دستی ثابت نگه‌داشته شد و سپس با استفاده از دنده‌های متفاوت مسیر ثابت ۳۰۰ متری طی شد. در نهایت با ثبت زمان حرکت، سرعت پیشروی تراکتور تعیین گردید؛ بنابراین برای انجام آزمایش‌های اصلی گاز دستی ثابت و با تغییر دنده سرعت موردنظر حاصل شد. در شکل ۲، نیروسنج



شکل ۲- نیروسنج S شکل نصب شده بین دو تراکتور در کشش دو تراکتوری.
Figure 2. S shaped loadcell installed between tractors at RNAM test.

مشخص شود. در لحظه رسیدن تراکتور به شاخص ابتدایی، کلید شروع به کار دینامومتر روشن شد. در گام بعد اعداد نمایش داده شده در نمایشگر ثابت مدل DN-10W یادداشت شد. داده‌های اکتسابی برای هر کرت حدود ۲۵ تا ۳۰ عدد بود. این مقادیر معادل نیروی کشش ناخالص (کشش با بار) یا به عبارتی برابر مجموع مقاومت غلتشی تراکتور آروید ۳۵۴ و نیروی کشش خالص گاواهن دوار است. با میانگین‌گیری از داده‌های اکتسابی از نیروسنج مقدار نیروی کشش ناخالص در هر کرت تعیین می‌شود. در گام پایانی با بالا آوردن اهرم هیدرولیک تراکتور، گاواهن از خاک خارج شده و مسیر کرت بدون بار طی گردید. مقادیر به دست آمده توسط نیروسنج در این حالت نیروی مقاومت غلتشی تراکتور آروید (کشش بی‌بار) است. توسط میانگین‌گیری داده‌ها در این گام نیروی مقاومت غلتشی تراکتور برای هر کرت تعیین شد (۱۷). برای محاسبه نیروی کشش خالص گاواهن دوار، مقدار مقاومت غلتشی از مقدار کشش ناخالص کم شد. از آنجایی‌که در این پژوهش تأثیر سرعت دورانی گاواهن دوار در سه سطح، وضعیت درپوش گاواهن دوار در سه سطح و سرعت پیشروی در سه سطح بر مقاومت کششی گاواهن دوار و میزان خردشدگی خاک مورد ارزیابی قرار گرفت، تمامی مراحل بالا برای هر تیمار سه بار تکرار و داده‌ها جمع‌آوری گردید.

برای ثبت اطلاعات خروجی از نیروسنج S شکل، از ثابت دیجیتالی مدل DN10 شرکت داسل (Dacell) استفاده شد. این نوع از ثابت‌ها مطابق با حسگرهای نوع کرنش‌سنج مانند لودسل و مبدل فشار، طراحی شده‌اند. این نوع ثابت‌ها قادر هستند بسته به هدف موردنظر در فواصل زمانی متفاوت اطلاعات را ثبت کنند که در پژوهش حاضر نرخ ثبت اطلاعات هر ثانیه یک مرتبه بود. خروجی ثابت بر حسب کیلوگرم نیرو بود.

در روش کشش دو تراکتوری در هر کرت آزمایشی، تنظیم سرعت توسط گاز دستی ثابت و تغییر دنده برای تراکتور مسی فرگوسن انجام گردید و با استفاده از بازوهای هیدرولیکی، ارتفاع نیروسنج تنظیم و کاملاً موازی با سطح افق قرار گرفت. در گام بعد تراکتور آروید در دنده خلاص قرار گرفت و از طریق تغییر طول بازوهای جانبی تراکتور عمق گاواهن تنظیم گردید و گاواهن در عمق مورد نظر مستقر شد. در ادامه محور تواندهی تراکتور آروید ۳۵۴ فعال شد تا از این طریق گشتاور مورد نیاز برای چرخش محور گاواهن دوار فراهم شود. بدین ترتیب تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ نیروی لازم برای پیشروی و تراکتور آروید ۳۵۴ گشتاور لازم برای اجرای شخم توسط گاواهن دوار را تأمین کردند (شکل ۳). برای اندازه‌گیری نیروی کششی در فواصل ۲۰ متری شاخص‌هایی قرار داده شده تا ابتدا و انتهای هر کرت



شکل ۳- انجام کشش دو تراکتوری (RNAM) در مزرعه.

Figure 3. Doing RNAM method at field.

به منظور اندازه‌گیری و ارزیابی میزان خردشدگی خاک در هر تیمار آزمایشی از روش اندازه‌گیری میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها استفاده گردید. این روش با کاربرد الک‌هایی با مش‌های متفاوت که در جهت عمودی از بزرگ به کوچک مرتب شده‌اند، انجام شد. مقادیر میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد (۱۵):

$$MWD = \frac{\sum(W_i D_i)}{W_t} \quad (2)$$

در این رابطه، MWD میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها (میلی‌متر)، W_i وزن خاک باقی‌مانده روی الک i مورد نظر (گرم)، D_i میانگین قطر خاکدانه‌های باقی‌مانده بر روی هر الک i (میانگین قطر سوراخ‌های الک بالایی و پایینی) (میلی‌متر)، W_t وزن کل خاک خرد شده در هر نمونه مورد آزمایش (گرم).

نمونه‌برداری بدین شکل انجام شد که در هر کرت آزمایشی در فواصل ۵ متری سه نمونه از نقاط ابتدایی، انتهایی و وسط گاوآهن برداشته شد. پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه برای تعیین میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها از الک‌های با مش‌بندی متفاوت استفاده گردید. الک‌ها به ترتیب از بزرگ به کوچک دارای مش‌بندی ۱۰، ۴، ۲/۳۶، ۱/۴، ۱، ۰/۵ و ۰/۱۸ میلی‌متر بودند. از دستگاه تکاننده برای الک کردن نمونه‌ها استفاده شد به گونه‌ای که الک‌ها به ترتیب از بزرگ به کوچک روی دستگاه قرار گرفته و سپس نمونه روی الک شماره ۱۰ (بالاترین الک) ریخته شد و سپس تکاننده به مدت ۵ دقیقه شروع به کار کرد. در نهایت خاک جامانده روی هر الک با ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۱ گرم توزین شد. تجزیه و تحلیل آماری نتایج به دست آمده با استفاده از روش تجزیه واریانس در نرم‌افزار مینی‌تب ۱۸ انجام شد. هم‌چنین مقایسه میانگین آماری تیمارها با استفاده از روش توکی انجام شد.

برای مدل‌سازی خردشدگی خاک و نیروی کشش گاوآهن دوار از روش مدل‌سازی سطح پاسخ استفاده شد. این روش، جدیدتر از روش‌هایی مانند شبکه عصبی مصنوعی، منطق فازی و ترکیب آن‌ها یعنی انفیس است و دقت پیش‌بینی را بسیار بالا می‌برد. به علاوه دقت بهینه‌سازی با روش سطح پاسخ بسیار قابل قبول است. پارامترهای سرعت پیشروی تراکتور، سرعت دورانی و وضعیت درپوش گاوآهن دوار به عنوان متغیرهای مستقل در ورودی و پارامترهای میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها و نیروی کشش گاوآهن دوار به عنوان متغیرهای پاسخ در خروجی در این پژوهش ارزیابی شدند. معادلات توسط روش حداقل مربعات (Least Square) حل و ضرایب معادلات استخراج گردید. پس از آن که ضرایب معادلات حاصل شد با حل معادله، پاسخ پیش‌بینی شد. در گام بعد مطابقت مدل با داده‌های آزمایش ارزیابی شد. این فرآیند توسط روش‌های متعددی مانند تحلیل باقی‌مانده، ریشه میانگین مربعات خطاهای پیش‌بینی شده و آزمون عدم تطابق انجام شد. با استفاده از ضریب تبیین (R^2) کیفیت و دقت برازش داده‌های تجربی توسط مدل مشخص شد. دقت و توانایی مدل در پیش‌بینی داده‌های جدید توسط همین ضریب تعریف شد و معنی‌داری آماری آن توسط آزمون آماری فیشر (F-Value) معین گردید. هم‌چنین معنی‌داری هر یک از ضرایب رگرسیون (مدل) بر مبنای آزمون t مشخص شد. در نهایت مدل‌های حاصله تجزیه و تحلیل آماری شدند تا مدل مناسب انتخاب گردد. از نظر آماری مدلی مطلوب‌تر و بهینه است که دارای بالاترین مقدار R^2 باشد. هرچقدر R^2 به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، قدرت مدل برازش یافته در توصیف تغییرات پاسخ به عنوان تابعی از متغیرهای مستقل بیش‌تر است (۱۸). در نهایت برای مدل‌سازی خردشدگی و نیروی کشش گاوآهن دوار بر اساس

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس اثر عوامل سرعت پیشروی تراکتور، سرعت دورانی گاوآهن دوار و وضعیت درپوش بر تغییرات نیروی کشش و خردشدگی خاک در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان داد که تمامی اثرات اصلی به همراه اثرات متقابل دوتایی و سه تایی متغیرهای ورودی بر نیروی کششی مورد نیاز گاوآهن دوار معنی‌دار بودند. با توجه به این امر با بررسی اثر متقابل سه تایی متغیرهای ورودی می‌توان به تحلیل جامعی از تأثیر عوامل آزمایشی بر نیروی کششی مورد نیاز گاوآهن دوار رسید. همچنین در خصوص میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها (MWD)، نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تمامی اثرات اصلی و اثرات متقابل دوتایی فاکتورهای آزمایشی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بوده اما اثر متقابل سه تایی آنها معنی‌دار نشده است. با توجه به این‌که تمام اثرات متقابل دوتایی معنی‌دار می‌باشند با بررسی هر سه اثر متقابل دوتایی سرعت پیشروی \times سرعت دورانی گاوآهن، سرعت پیشروی \times وضعیت درپوش و سرعت دورانی گاوآهن \times وضعیت درپوش می‌توان به تحلیل جامعی از تأثیر عوامل آزمایشی بر میانگین قطر وزنی (MWD) خاکدانه‌ها رسید.

مقایسه میانگین اثر متقابل سه تایی متغیرهای ورودی بر نیروی کشش گاوآهن دوار: در شکل ۴ اثر متقابل سه تایی سرعت پیشروی، سرعت دورانی و وضعیت درپوش گاوآهن دوار بر نیروی کشش گاوآهن دوار ارائه شده است.

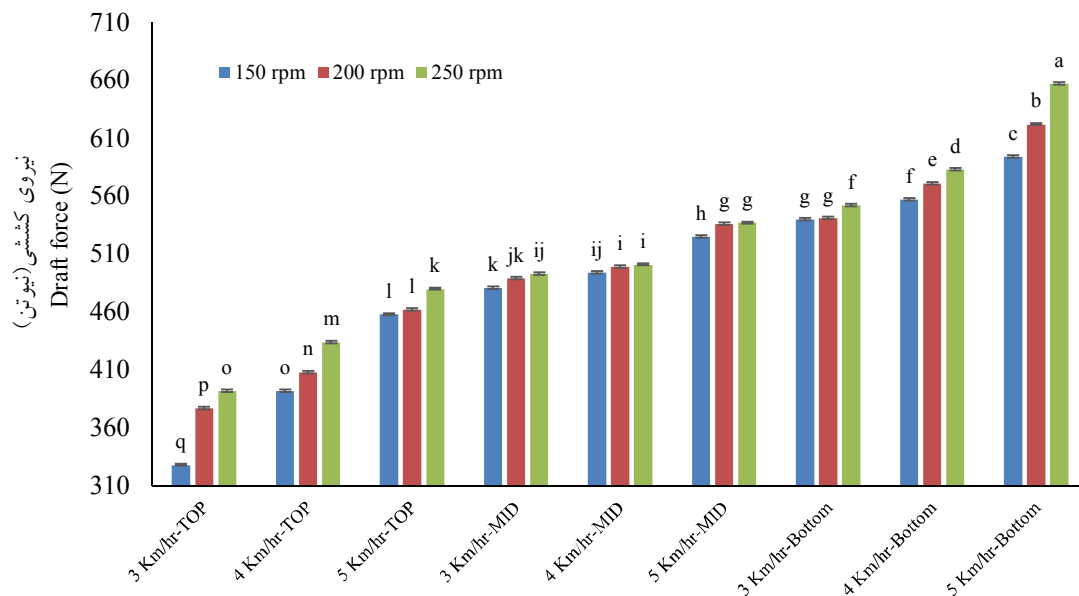
تغییرات سرعت پیشروی تراکتور، سرعت دورانی و وضعیت قرارگیری درپوش گاوآهن دوار از نرم‌افزار متخصص طراحی (Design Expert) نسخه ۱۰ استفاده شد.

برای بهینه‌سازی در بررسی یک فرآیند، معمولاً بهینه شدن هم‌زمان چند هدف موردنظر بوده که با هم در تضاد هستند. برای این امر روشی چند پاسخی معرفی شده است که معیار رضایتمندی دارد. این معیار محدوده رضایتمندی مربوط به هر پاسخ را تعیین می‌کند (۳۴). معیار رضایتمندی بین صفر و یک متغیر است. در این روش برای هر متغیر مستقل و برای هر پاسخ هدفی تعیین می‌شود. در پژوهش حاضر دو پاسخ شامل نیروی کشش گاوآهن و میانگین قطر وزنی (MWD) خاکدانه‌ها وجود دارد که هدف نهایی، بهینه کردن آنهاست. میانگین قطر وزنی (MWD) خاکدانه‌ها به عنوان پاسخ اصلی و مهم‌تر در نظر گرفته شد و وزن آن دو برابر نیروی کشش گاوآهن تعیین گردید. نتایج کلی پژوهش‌ها نشان داده است که یک بستر بذر مناسب برای حبوبات و غلات، بستری است که میانگین قطر وزنی (MWD) خاکدانه‌ها در محدوده ۱۰-۵ میلی‌متر باشد (۳۵، ۳۶ و ۳۷)؛ بنابراین در پژوهش حاضر، هدف بهینه برای میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها ۷/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. از سوی دیگر، محدوده بهینه عملکرد کششی تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ بررسی شده در سایر پژوهش‌های بالاتر از نیروی کششی ایجاد شده در این پژوهش می‌باشد (۳۸ و ۳۹)؛ بنابراین هدف بهینه برای بیشینه نیروی کششی ۶۰۰ نیوتن در نظر گرفته شد.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثر متغیرهای ورودی بر پارامترهای خروجی منتج از روش سطح پاسخ.

Table 2. ANOVA of the effects of input variables on the output parameters by RSM approach.

میانگین مربعات (Mean of Square) و معنی‌داری (P-Value)		درجه آزادی		منابع تغییر
P-Value	میانگین قطر وزنی خاک دانه‌ها MWD	P-Value	نیروی کششی Draft Force	Sources of variation
0.000	72.48**	0.000	41913**	سرعت پیشروی (A) Forward speed
0.000	68.67**	0.000	5220**	سرعت دورانی (B) Rotor speed
0.000	1155**	0.000	185424**	وضعیت درپوش (C) Shield position
0.75	0.23 ^{ns}	0.001	11**	تکرار (بلوک) Block
0.000	1.21**	0.019	86*	B × A
0.007	6.84**	0.007	2128**	C × A
0.000	6.56**	0.002	621**	C × B
0.88	0.12 ^{ns}	0.000	616**	A × B × C
0.000	25.4**	0.005	813.77**	A ²
0.96	9.21 ^{ns}	0.66	205.43 ^{ns}	B ²
0.004	121.1**	0.004	1212.34**	C ²
	0.15		28	اشتباه آزمایشی Error
			80	کل Total
			1.5	ضریب تغییرات CV



شکل ۴- تغییرات نیروی کشش نسبت به سرعت پیشروی، سرعت دورانی محور گردنده و وضعیت درپوش.

Figure 4. Change of draft force relative to forward speed, rotor speed and shield position.

و بدون ایجاد اصطکاک چندانی با تیغه از سطح زمین کنده شود، از آنجایی که اصطکاک و تعامل بین تیغه‌ها با زمین شخم نخورد باعث ایجاد کشش منفی و کاهش مقاومت کششی می‌شود، بنابراین افزایش سرعت دورانی گاواهن باعث افزایش نیروی کشش خواهد شد. در نهایت تعامل دو عامل مذکور باعث می‌شود که افزایش سرعت دورانی گاواهن تأثیر ناچیزی بر افزایش نیروی کشش داشته باشد. چنین روندی در سایر تحقیقات نیز گزارش شده است (۱۰، ۱۱، ۲۴ و ۲۵).

هم‌چنین مشخص شد که وضعیت درپوش گاواهن، بیش‌ترین تأثیر را بر میزان نیروی کشش گاواهن دارد (۱۲). علت چنین پدیده‌ای را می‌توان بدین گونه تشریح کرد که هرچه درپوش در وضعیت پایین‌تری قرار بگیرد، قطعات (تکه‌های) خاک در فضای بین تیغه‌ها و درپوش محصور شده و باعث ایجاد مقاومت در مقابل حرکت روبه جلوی گاواهن می‌شوند. از سوی دیگر جرم خاک محصور شده در این فضا تا حدی توسط تراکتور در مسیر افقی حمل می‌شود که متعاقباً منجر به افزایش نیروی کشش می‌گردد. به علاوه، با ثابت نگه داشتن عامل وضعیت درپوش و تغییر سرعت دورانی گاواهن و سرعت پیشروی تراکتور تغییر چندانی در میزان نیروی کششی رخ نداد در حالی که با ثابت نگه داشتن دو عامل دیگر و تغییر وضعیت درپوش نیروی کششی تغییرات بزرگی را شاهد خواهد بود. پژوهش‌های متعددی در رابطه با تأثیر وضعیت درپوش بر انرژی مصرفی گاواهن دوار انجام شده است که تأیید می‌کنند پایین بودن درپوش باعث افزایش توان مصرفی تراکتور می‌شود، با این حال پژوهش‌های خاصی در مورد تأثیر وضعیت درپوش بر نیروی کشش گاواهن دوار انجام نشده است (۲۶، ۲۷ و ۲۸). هم‌چنین عامل سرعت پیشروی نسبت به عامل سرعت دورانی گاواهن باعث

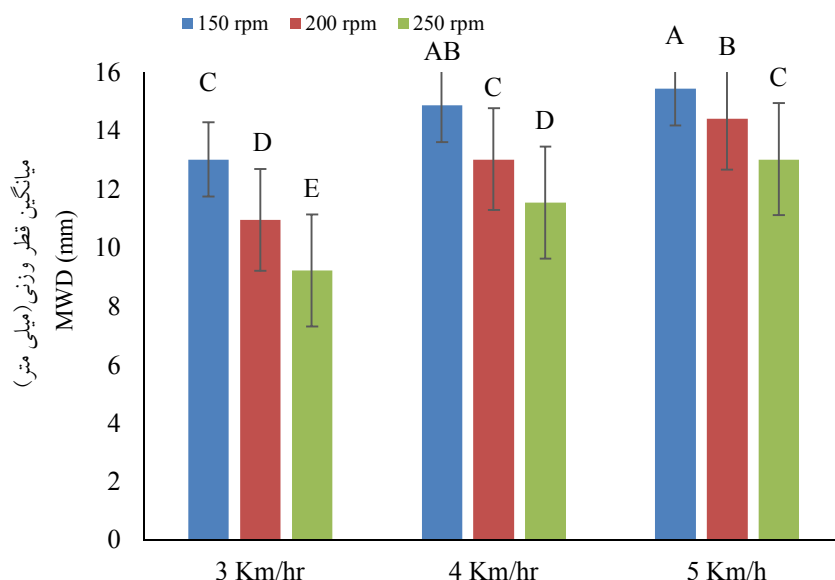
با توجه به شکل ۴ مشخص شد که با افزایش سرعت پیشروی و سرعت دورانی گاواهن دوار و هم‌چنین پایین‌آوردن درپوش، نیروی کشش افزایش یافت. دلیل افزایش نیروی کشش در اثر افزایش سرعت پیشروی را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که با افزایش سرعت حرکت شتاب وارده بر ذرات خاک بیش‌تر شده و خاک به فواصل دورتری پرتاب می‌شود و این امر مستلزم مصرف انرژی و نیروی بیش‌تری است (۱۹ و ۲۰). این پدیده عمدتاً به سبب شتاب بیش‌تری بود که هر نوع خاک در صورت جابه‌جایی سریع‌تر آن به خود می‌گیرد. شتاب گرفتن خاک حداقل به دو دلیل مقاومت کششی را افزایش داد. یکی به این علت که بارهای عمودی بر روی سطح درگیر با خاک را افزایش داده و از این طریق مقاومت اصطکاکی را افزایش می‌دهند و علت دیگر انرژی جنبشی اعمال شده به خاک می‌باشد (۲۱ و ۲۲). هم‌چنین افزایش سرعت پیشروی باعث می‌شود خاک فرصت خروج از بین تیغه‌های دستگاه را پیدا نکند و تا حدی توسط گاواهن در امتداد مسیر حرکت حمل شود که این امر خود باعث افزایش نیروی کشش می‌شود (۲۳).

هم‌چنین مشخص شد که تغییر سرعت دورانی تأثیر چندانی بر تغییر نیروی کشش گاواهن نداشت و در بیش‌تر حالات با ثابت ماندن سرعت پیشروی و وضعیت درپوش، تغییر سرعت دورانی گاواهن تأثیر چندانی بر تغییر نیروی کشش نداشت و اختلاف بین تیمارها معنی‌دار نبود. افزایش سرعت دورانی گاواهن از یکسو باعث می‌شود که قطعات خاک به ذرات ریزتری تبدیل شده و به راحتی از فضای بین تیغه‌ها خارج شده و بنابراین در امتداد مسیر حرکت توسط گاواهن حمل نشوند و متعاقباً نیروی کشش کاهش یابد. از سوی دیگر افزایش سرعت دورانی باعث می‌شود که خاک به تکه‌های کوچک‌تری تقسیم شود

درپوش پایین، وضعیت متضاد با حالت قبلی رخ داد به گونه‌ای که در پایین‌ترین سرعت پیشروی تغییرات سرعت دورانی تأثیر ناچیزی بر میزان نیروی کششی داشت در حالی که در بالاترین سرعت پیشروی تغییرات سرعت دورانی تأثیر بزرگی (معنی‌دار) بر میزان نیروی کششی داشت که در سایر پژوهش‌ها نیز اثبات شده است (۱۲).

در شکل ۵ اثر متقابل دوتایی سرعت پیشروی در سرعت دورانی گاوآهن بر میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها (MWD) ارائه شده است.

ایجاد تغییرات بزرگ‌تری در نیروی کشش می‌شود به گونه‌ای که با ثابت نگه داشتن سرعت دورانی و تغییر سرعت پیشروی تغییرات بزرگ‌تری در نیروی کشش رخ داد در حالی که با ثابت نگه داشتن سرعت پیشروی و تغییر سرعت دورانی گاوآهن تغییر چندانی در نیروی کششی رخ نخواهد داد. اگر درپوش کاملاً باز باشد، در پایین‌ترین سرعت پیشروی تغییرات سرعت دورانی باعث ایجاد تغییرات بزرگ در نیروی کشش می‌شود در حالی که در بالاترین سرعت پیشروی تغییرات سرعت دورانی تأثیر ناچیزی بر میزان نیروی کششی دارد. از سوی دیگر در حالت



شکل ۵- تغییرات میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها (MWD) نسبت به سرعت پیشروی و سرعت دورانی گاوآهن دوار.

Figure 5. Change of MWD relative to forward speed and rotor speed.

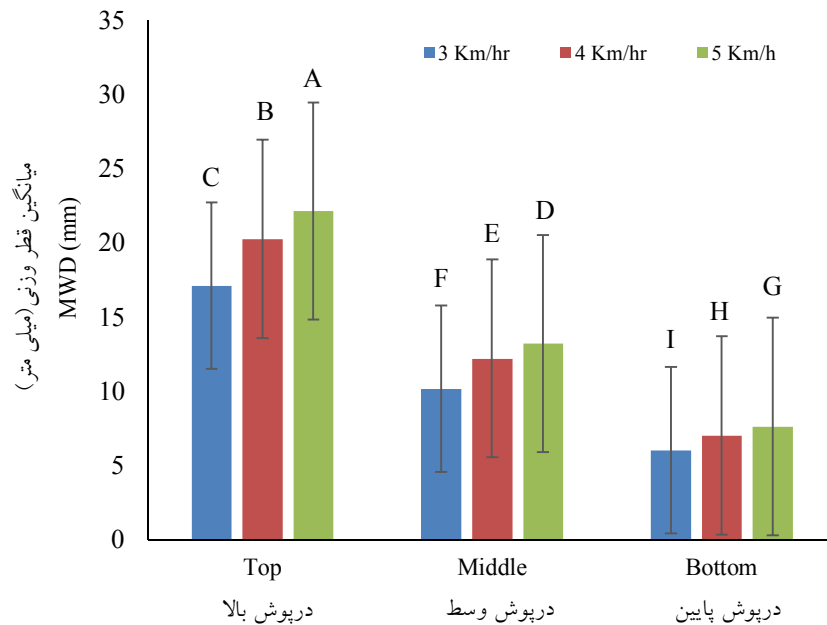
می‌یابد و در نتیجه خاک به ذرات کوچک‌تری تبدیل می‌شود. چنین روندی در سایر پژوهش‌ها نیز گزارش شده است (۲۹ و ۳۰). هم‌چنین با افزایش سرعت دورانی محور گردنده گاوآهن، میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها کاهش یافته‌است. بدیهی هست که با افزایش سرعت دورانی محور، تیغه‌ها در مدت زمان ثابت برخورد بیش‌تری با سطح خاک خواهند داشت و

با توجه به شکل ۵ مشخص گردید که با کاهش سرعت پیشروی تراکتور و افزایش سرعت دورانی گاوآهن دوار، میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها کاهش یافته است. دلیل کاهش میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که با کاهش سرعت پیشروی با توجه به ثابت بودن سرعت دورانی محور تیغه‌ها، تعداد برخوردهای تیغه به خاک افزایش

مشخص شد که در محدوده مطالعه حاضر تغییرات سرعت پیشروی و سرعت دورانی محور تأثیر برابری در خردشدگی خاک دارند.

در شکل ۶ اثر متقابل دو تایی سرعت پیشروی در وضعیت درپوش بر میانگین قطر وزنی (MWD) خاکدانه‌ها ارائه شده است.

آن را به قطعات ریزتری تبدیل می‌کنند. این روند در سایر پژوهش‌ها نیز گزارش شده است و به‌عنوان یکی از راهکاری مطلوب برای کنترل خردشدگی خاک پیشنهاد می‌شود (۲۷). با کاهش سرعت پیشروی تراکتور تأثیر تغییرات سرعت دورانی محور بر کاهش میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها افزایش می‌یابد. هم‌چنین



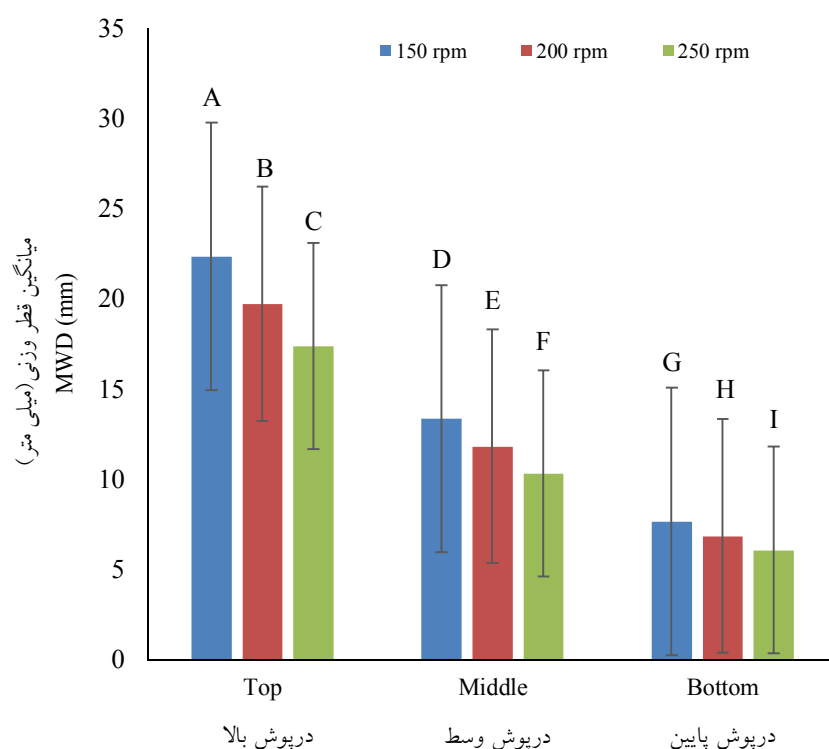
شکل ۶- تغییرات میانگین قطر وزنی (MWD) خاکدانه‌ها نسبت به سرعت پیشروی و وضعیت درپوش.

Figure 6. Change of MWD relative to forward speed and shield position.

سرعت پیشروی، تأثیر بیش‌تری بر میزان خردشدگی خاک دارد به گونه‌ای که با ثابت بودن وضعیت درپوش تغییر سرعت پیشروی تأثیر کمی بر خردشدگی خاک داشته اما با ثابت بودن سرعت، تغییر وضعیت درپوش باعث ایجاد تغییرات بزرگ در خردشدگی خاک می‌شود. هم‌چنین زمانی که درپوش در وضعیت بالا قرار دارد تأثیر سرعت پیشروی بر خردشدگی خاک نسبت به زمانی که درپوش در وضعیت پایین قرار دارد بیش‌تر است.

در شکل ۷ اثر متقابل دو تایی سرعت دورانی گاوآهن در وضعیت درپوش بر میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها (MWD) ارائه شده است.

شکل ۶ نشان می‌دهد که هرچه درپوش در موقعیت پایین‌تری قرار می‌گرفت و تیغه‌ها در محیط بسته‌تری فعالیت می‌کردند، خاک به قطعات ریزتری تبدیل می‌شد. دو عامل در ایجاد چنین روندی تأثیرگذار بودند. برخورد قطعات خاک به درپوش باعث ایجاد ضربه در قطعه خاک شده و در نتیجه خاک به قطعات ریزتری تبدیل می‌شود از سوی دیگر با پایین بودن درپوش، خاک در فضای بین تیغه‌ها و درپوش محبوس شده و مدت زمان بیش‌تری مورد اصابت تیغه‌ها قرار گرفته و ریزتر می‌شود. نتایج حاضر با نتایج سایر پژوهش‌ها، مطابقت دارد (۳۱) و (۳۲). مشخص شد که وضعیت درپوش نسبت به



شکل ۷- تغییرات میانگین قطر وزنی (MWD) خاکدانه‌ها نسبت به سرعت دورانی گاوآهن و وضعیت درپوش.

Figure 7. Change of MWD relative to rotor speed and shield position.

مدل‌سازی نیروی کشش گاوآهن دوار و خردشدگی خاک به کمک روش سطح پاسخ: در جدول ۲ مشخص است که اثر متقابل سرعت پیشروی در سرعت دورانی گاوآهن، اثر متقابل وضعیت درپوش در سرعت دورانی گاوآهن و همچنین اثر درجه دوم سرعت دورانی گاوآهن معنی‌دار نشده‌اند و تأثیری در دقت مدل پیش‌بینی نیروی کشش گاوآهن نداشتند. همچنین مشخص شد که وضعیت درپوش بیش‌ترین تأثیر را بر تغییرات متغیر پاسخ دارد. معادلات ۳ و ۴، معادلات رگرسیونی در خروجی روش سطح پاسخ به ترتیب به‌منظور پیش‌بینی نیروی کشش و میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها (خردشدگی خاک) توسط گاوآهن دوار براساس تغییرات متغیرهای ورودی (مستقل) ارائه شده است. در حالت کلی، برای برازش مطلوب مدل‌های رگرسیونی، مقدار ضریب تبیین (R^2) باید حداقل ۰/۸ باشد (۳۳).

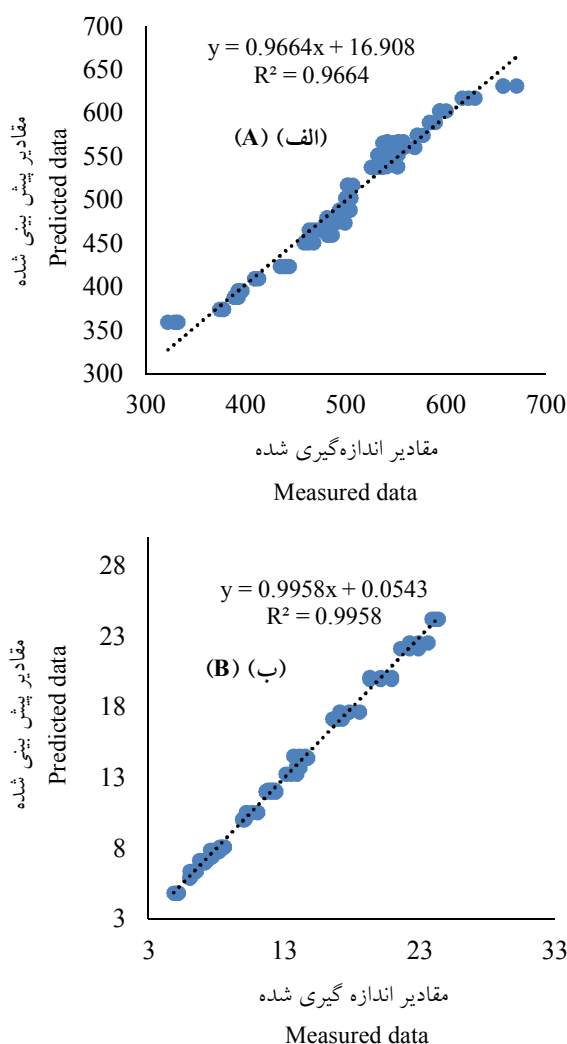
وضعیت درپوش نسبت به سرعت دورانی گاوآهن تأثیر بیش‌تری بر میزان خردشدگی خاک دارد به‌گونه‌ای که با ثابت بودن وضعیت درپوش تغییر سرعت دورانی گاوآهن تأثیر چندانی بر خردشدگی خاک ندارد اما با ثابت بودن سرعت، تغییر وضعیت درپوش باعث ایجاد تغییرات بزرگ در خردشدگی خاک می‌شود. همچنین زمانی که درپوش در وضعیت بالا قرار دارد تأثیر سرعت دورانی گاوآهن بر خردشدگی خاک نسبت به زمانی که درپوش در وضعیت پایین قرار دارد بیش‌تر است. با بررسی هم‌زمان شکل‌های ۵، ۶ و ۷ می‌توان نتیجه گرفت در محدوده مورد مطالعه تغییر وضعیت درپوش بیش‌ترین تأثیر را بر میزان خردشدگی خاک دارد و تفاوت چندانی بین تأثیر تغییر سرعت پیشروی و تغییر سرعت دورانی گاوآهن وجود ندارد.

$$\text{draft force} = 190.5 - 28.6 \text{ FS} + 0.286 \text{ RS} + 151.9 \text{ P} + 10.15 \text{ FS} \times \text{FS} - 10.47 \text{P} \times \text{P} - 6.84 \text{ FS} \times \text{P} \quad (3)$$

$$\text{MWD} = 29.07 + 5.656 \text{ FS} - 0.0932 \text{ RS} - 12.472 \text{ P} - 0.461 \text{ FS} \times \text{FS} + 1.505 \text{ P} \times \text{P} + 0.0068 \text{ FS} \times \text{RS} - 0.858 \text{ FS} \times \text{P} + 0.017 \text{ RS} \times \text{P} \quad (4)$$

میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها (خردشدگی خاک) با استفاده از مدل منحنی سطح پاسخ در شکل ۸ ارائه شده است. با توجه به این شکل مشخص است که روش سطح پاسخ توانایی بسیار بالایی برای پیش‌بینی نیروی کشش گاوآهن دوار (ضریب تبیین=۰/۹۶) و میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها (MWD) (ضریب تبیین=۰/۹۹) دارد.

در این روابط، FS سرعت پیشروی بر حسب کیلومتر بر ساعت، RS سرعت دورانی محور گردنده گاوآهن بر حسب دور بر دقیقه و P وضعیت قرارگیری درپوش گاوآهن است که به ترتیب برای وضعیت‌های بالا، وسط و پایین مقادیر ۱، ۲ و ۳ می‌باشد. ارتباط بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده نیروی کشش و

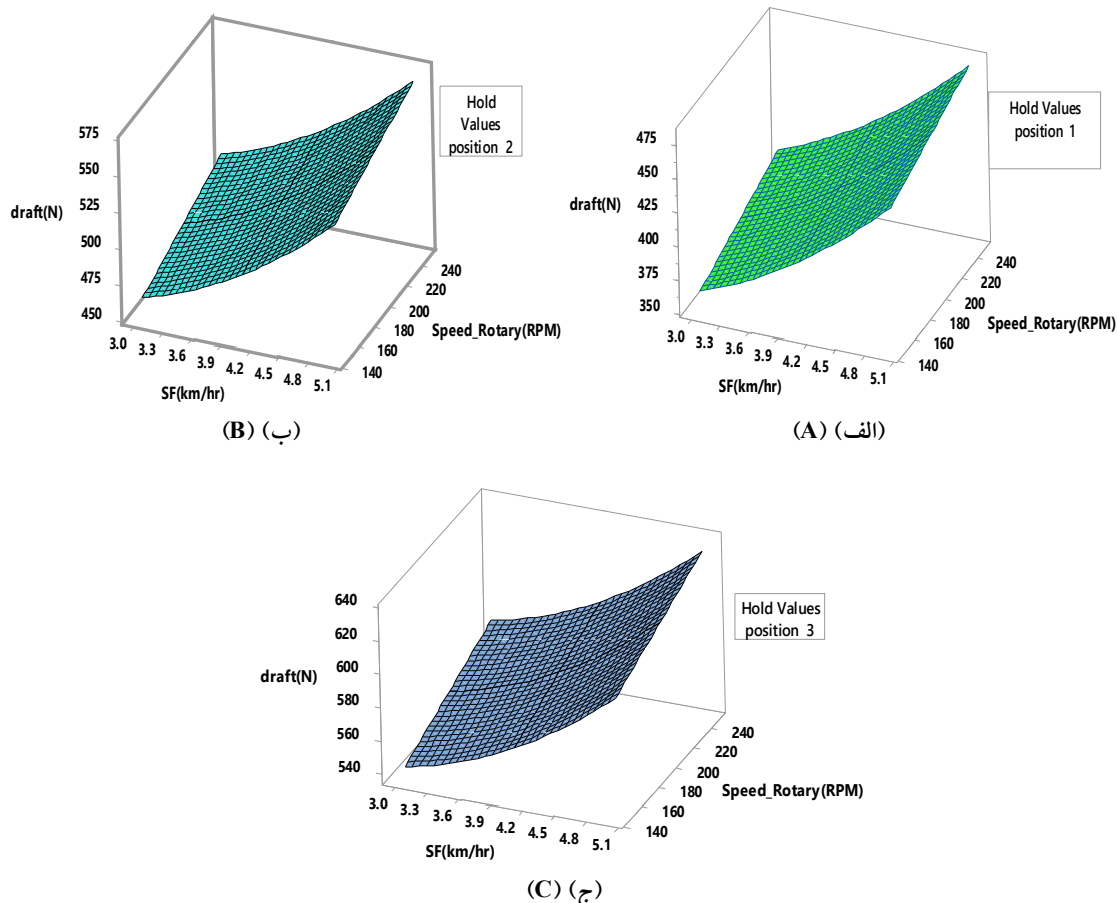


شکل ۸- ارتباط بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده (الف) نیروی کششی و (ب) میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها (MWD) توسط روش سطح پاسخ.

Figure 8. Relationship between measured and predicted (A) draft force and (B) MWD data using RSM approach.

پاسخ رسم شده‌اند. همچنین افزایش هم‌زمان سرعت پیشروی و سرعت دورانی گاوآهن تشدیدکننده افزایش نیروی کششی است و منحنی در نقطه تلاقی بیشینه این دو عامل به‌صورت نوک تیز درآمده است.

تغییرات نیروی کشش گاوآهن در اثر تغییرات سرعت پیشروی و سرعت دورانی گاوآهن در شکل ۹ به‌صورت منحنی‌های سه بعدی رسم شده است. منحنی‌های حاصل بر اساس پیش‌بینی مدل سطح



شکل ۹- منحنی‌های سه‌بعدی تغییرات نیروی کشش گاوآهن دوار در اثر تغییرات سرعت پیشروی و سرعت دورانی محور گردنده در سه وضعیت درپوش (الف) درپوش بالا، (ب) درپوش وسط و (ج) درپوش پایین.

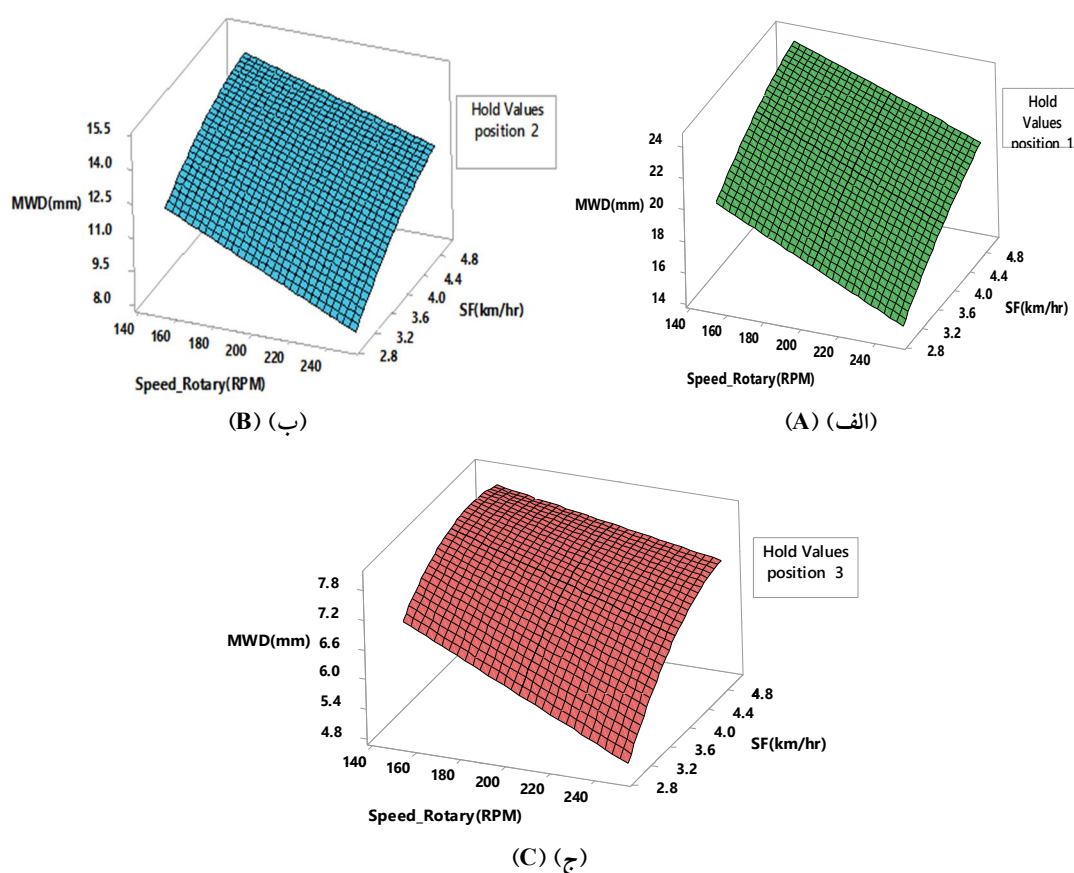
Figure 9. 3D diagrams of draft force change of rotary plow caused by forward and rotor speed change at 3 shield position (A) shield top (B) shield middle and (C) shield bottom.

اضافه شدند و در نهایت مدلی که بیش‌ترین دقت را حاصل کرد به عنوان مدل نهایی انتخاب شد. با توجه به نتایج مشخص است که تنها اثر درجه دوم سرعت دورانی گاوآهن معنی‌دار نشد و تأثیری در دقت مدل پیش‌بینی میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها (MWD) نداشت. همچنین مشخص شد که وضعیت درپوش بیش‌ترین تأثیر را بر MWD دارد.

در مدل‌سازی میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها (MWD) بر اساس روش سطح پاسخ از مدل کامل که شامل اثرات ساده، متقابل و درجه دوم عوامل (سرعت پیشروی تراکتور، سرعت دورانی محور گردنده گاوآهن و وضعیت درپوش) می‌باشد، استفاده شد. مدل‌سازی با استفاده از فرایند رگرسیون گام به گام انجام شد به‌گونه‌ای که مدل‌سازی در ابتدا با مشارکت یک اثر شروع شد و به نوبت اثرات به مدل

تغییرات میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها (MWD) نسبت به سرعت دورانی گاوآهن با کاهش سرعت پیشروی افزایش یافته است؛ به‌گونه‌ای که در سرعت پیشروی بالا، کاهش سرعت دورانی تغییرات چندانی در میزان میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها (MWD) ایجاد نکرده است. در حالی‌که در سرعت پیشروی پایین، کاهش سرعت دورانی تغییرات بزرگتری در میزان میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها (MWD) ایجاد کرده است. همچنین کاهش سرعت پیشروی هم‌زمان با افزایش سرعت دورانی گاوآهن تشدیدکننده کم‌تر شدن میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها (MWD) است و منحنی در نقطه تلاقی بیشینه و کمینه این دو عامل به‌صورت نوک تیز درآمده است.

تغییرات میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها (MWD) در اثر تغییرات سرعت پیشروی و سرعت دورانی گاوآهن دوار در شکل ۱۰ به صورت منحنی‌های سه‌بعدی رسم شده است. منحنی‌های حاصل بر اساس پیش‌بینی مدل سطح پاسخ رسم شده‌اند. در شکل ۱۰ بخش‌های الف، ب و ج به ترتیب مربوط به وضعیت درپوش بالا، وسط و پایین هستند. با نگاه دقیق‌تر، رابطه خطی بین میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها (MWD) و تغییرات سرعت پیشروی و سرعت دورانی در وضعیت درپوش بالا قابل تشخیص است؛ اما در حالت درپوش وسط و به‌خصوص حالت درپوش پایین رابطه بین میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها (MWD) با سرعت پیشروی فرم درجه دو به خود گرفته است. از سوی دیگر در حالت درپوش پایین



شکل ۱۰- منحنی‌های سه‌بعدی تغییرات میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها در اثر تغییرات سرعت پیشروی، سرعت دورانی گاوآهن، الف) درپوش بالا، ب) درپوش وسط و ج) درپوش پایین.

Figure 10. 3D diagrams of soil MWD change caused by forward and rotor speed change at 3 shield position (A) shield top (B) shield middle and (C) shield bottom.

درپوش به سمت ۳ میل کند یعنی درپوش پایین آورده شده و برعکس هرچه عدد وضعیت درپوش به سمت ۱ میل کند یعنی درپوش بالاتر برده شده است و عدد ۲ حد وسط است. نتایج جدول ۳ نشان داد که تمامی راه‌حل‌ها مابین وضعیت وسط و پایین درپوش حاصل شده است.

در جدول ۳ نتایج بهینه‌سازی و مقادیر معیار رضایتمندی برای هر تیمار ارائه شده است. نقطه بهینه در سرعت پیشروی ۴/۸۲ کیلومتر بر ساعت، وضعیت درپوش پایین (با کمیت ۳) و سرعت دورانی ۱۷۰/۲ دور بر دقیقه با رضایتمندی ۰/۹۷۹ می‌باشد. همان‌گونه که قبلاً نیز ذکر گردید، هرچه عدد مربوط به وضعیت

جدول ۳- نتایج بهینه‌سازی عملیات خاکورزی توسط گاوآهن دوار.

Table 3. Optimization results of tillage operation by rotary plow.

رضایتمندی Desirability	نیروی کششی Draft force	میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها MWD	وضعیت درپوش Shield position	سرعت دورانی محور گردنده Rotor speed	سرعت پیشروی Forward speed	راه‌حل Solution
0.979	599	7.76	3	170.2	4.82	1
0.911	532	7.5	2.88	152.2	3.06	2
0.888	516	7.5	2.27	250	3.22	3
0.87	623	7.52	2.87	249	4.98	4
0.86	535	8.1	2.44	233	3.63	5
0.777	511	9	2.15	242	3.51	6
0.765	573	10.2	2.3	242.2	4.77	7
0.73	563	10.5	2.3	222.5	4.69	8
0.636	478	10.4	2.16	164.6	3	9

خردشدگی خاک داشت؛ بنابراین تنظیم صحیح درپوش تأثیر به‌سزایی بر کاهش مصرف سوخت و جلوگیری از فرسایش خاک دارد. براساس تحلیل‌های این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که روش منحنی سطح پاسخ توانایی بالایی در مدل‌سازی نیروی کشش گاوآهن دوار (ضریب تبیین=۰/۹۶) و خردشدگی خاک (ضریب تبیین=۰/۹۹) دارد و قادر است نقاط بهینه‌ای را معرفی کند که رضایتمندی هر دو پاسخ را تأمین می‌کنند. نتایج حاصل از بهینه‌یابی هم‌زمان نیروی کشش ۶۰۰ نیوتن و میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها ۷/۵ میلی‌متر، ۹ راه‌حل را در محدوده مورد مطالعه معرفی کرد که بهترین راه‌حل بیانگر نقطه بهینه در سرعت پیشروی ۴/۸۲ کیلومتر بر ساعت، وضعیت درپوش پایین (با کمیت ۳) و سرعت دورانی

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش سرعت پیشروی و سرعت دورانی گاوآهن دوار به ترتیب موجب کاهش و افزایش خردشدگی خاک و هر دو منجر به افزایش نیروی کشش می‌شوند. پایین آمدن درپوش گاوآهن دوار باعث افزایش خردشدگی خاک و افزایش نیروی کشش می‌شود. وضعیت درپوش گاوآهن، بیش‌ترین تأثیر، سرعت دورانی کم‌ترین تأثیر و سرعت پیشروی تأثیر متوسطی را بر نیروی کشش گاوآهن دوار دارند. وضعیت درپوش گاوآهن بیش‌ترین تأثیر و سرعت دورانی و سرعت پیشروی اثر معادلی را بر خردشدگی خاک دارند. در نتیجه، در محدوده مورد مطالعه، وضعیت قرارگیری درپوش گاوآهن بیش‌ترین تأثیر را بر نیروی کشش و

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: آماده‌سازی داده‌ها، انجام محاسبات، تهیه پیش‌نویس مقاله

نویسنده دوم: طرح تحقیق و روش‌شناسی، اصلاح و تلفیق نهایی مقاله، مشارکت در تجزیه و تحلیل‌ها، نظارت تحقیق

نویسنده سوم: تهیه و آماده‌سازی داده‌ها
نویسنده چهارم: بازبینی مقاله، مشارکت در طرح و روش تحقیق، بازبینی مقاله.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها است.

حمایت مالی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد آقای امیرحسین یآوری صورت گرفته است.

۱۷۰/۲ دور بر دقیقه با رضایتمندی ۰/۹۷۹ است. با توجه به مباحث صرفه‌جویی در مصرف انرژی پیشنهاد می‌گردد از روش سطح پاسخ برای بهینه‌سازی مصرف سوخت تراکتور نیز استفاده شود. همچنین در مزرعه پیشنهاد می‌گردد که کشاورز موقع استفاده از گاوآهن دوار از سرعت پیشروی بیشتر، سرعت دورانی محور گردنده کم‌تر و وضعیت درپوش پایین به‌منظور دستیابی به حداکثر بهره‌وری از انرژی و جلوگیری از فرسایش خاک استفاده نماید.

تقدیر و تشکر

نویسندگان متن حاضر نهایت سپاس و تشکر خود را از مجموعه دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به‌علت مساعدت ایشان در انجام این پژوهش بیان می‌دارند.

داده‌ها و اطلاعات

این مقاله مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول آقای امیرحسین یآوری با عنوان "پیش‌بینی و بهینه‌سازی میزان خردشدگی خاک در طی عملیات خاک‌ورزی ترکیبی با استفاده از روش سطح پاسخ" در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به تاریخ دفاعیه ۱۴۰۱/۰۶/۲۱ است. مکان انجام طرح مزارع تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری بود.

منابع

1. Liu, Z., Cao, S., Sun, Z., Wang, H., Qu, S., Lei, N., & Dong, Q. (2021). Tillage effects on soil properties and crop yield after land reclamation. *Scientific Reports*, 11 (1), 1-12.
2. Shinoto, Y., Matsunami, T., Otani, R., & Maruyama, S. (2020). Effects of tillage on growth, yield and root lodging of six maize hybrids in upland fields converted from paddy fields in Andosol. *Plant Production Science*, 23 (1), 39-47.
3. Askari, M., Komarizade, M. H., Nikbakht, A. M., Nobakht, N., & Teimourlou, R. F. (2011). A novel three-point hitch dynamometer to measure the draft requirement of mounted implements. *Research in agricultural engineering*, 57 (4), 128-136.
4. Moitzi, G., Neugschwandtner, R. W., Kaul, H. P., & Wagentristl, H. (2021). Effect of tillage systems on energy input and energy efficiency for sugar beet and

- soybean under Pannonian climate conditions. *Plant, Soil and Environment*, 67 (3), 137-146.
5. Bogunovic, I., Pereira, P., Kistic, I., Sajko, K., & Sraka, M. (2018). Tillage management impacts on soil compaction, erosion and crop yield in Stagnosols (Croatia). *Catena*, 160, 376-384.
 6. Orzech, K., Wanic, M., & Załuski, D. (2021). The Effects of Soil Compaction and Different Tillage Systems on the Bulk Density and Moisture Content of Soil and the Yields of Winter Oilseed Rape and Cereals. *Agriculture*, 11 (7), 666.
 7. Drwish, L. A. (2020). Modeling the effect of soil-tool interaction on draft force using visual basic. *Annals of Agricultural Science, Moshtohor*, 58 (2), 223-232.
 8. Sarkar, P., Upadhyay, G., & Raheman, H. (2021). Active-passive and passive-passive configurations of combined tillage implements for improved tillage and tractive performance: A review. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 19 (4), 1-14. e02R01. <https://doi.org/10.5424/sjar/2021194-18387>.
 9. Schapel, A., Marschner, P., & Churchman, J. (2019). Influence of clay clod size and number for organic carbon distribution in sandy soil with clay addition. *Geoderma*, 33 (5), 123-132.
 10. Kiani, GH., & Tabatabae Koloor, R. (2011). Investigation the rototiller blade operational factors on the soil tillage of orchard and paddy fields. *Journal of Agricultural Machinery*, 1 (1), 34-40. [In Persian]
 11. Rajabi Vandchali, M., Hemmat, A., & Ghanbari Malidareh, A. (2015). Comparison of disk harrow, sicutiller and rotivator effectiveness at different humidities in a clay loam soil in Mazandaran. *Journal of Agricultural Machinery*, 5 (1), 63-72. [In Persian]
 12. Usaborisut, P., Sukcharoenvipharat, W., & Choedkiatphon, S. (2020). Tilling tests of rotary tiller and power harrow after subsoiling. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 19 (6), 391-400.
 13. Karami, H. R., Keyhani, M., & Mowla, D. (2016). Experimental analysis of drag reduction in the pipelines with response surface methodology. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 13 (8), 104-112.
 14. Pramanik, M., Khanna, M., Singh, M., Singh, D. K., Sudhishri, S., Bhatia, A., & Ranjan, R. (2022). Automation of soil moisture sensor-based basin irrigation system. *Smart Agricultural Technology*, 2, 1-11.
 15. Tang, C. S., Gong, X. P., Shen, Z., Cheng, Q., Inyang, H., Lv, C., & Shi, B. (2022). Soil micro-penetration resistance as an index of its infiltration processes during rainfall. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1, 1-8.
 16. ASABE Standards. 55th Ed. (2008a). S313.3 FEB99. Soil cone penetrometer. St. Joseph, Mich.: ASABE.
 17. Askari, M., Shahgholi, Gh., & Abbaspour-Gilandeh, Y. (2019). New wings on the interaction between conventional subsoiler and paraplow tines with the soil: effects on the draft and the properties of soil. *Archives of agronomy and soil science*, 65 (1), 88-100.
 18. Samavati, V. (2013). Polysaccharide extraction from *Abelmoschus esculentus*: Optimization by response surface methodology. *Carbohydrate polymers*, 95 (1), 588-597.
 19. Alele, J. O., Ngunjiri, G. M., & Njue, M. R. (2018). Effects of depth and speed on power requirements for disc and mouldboard ploughs in silt loam soils. *Int. J. Sci. Technol. Res.* 7 (8), 167-174.
 20. Salahloo, M., Mohammadi Alasti, B., Mardani, A., & Abbasgholipour, M. (2021). Effect of Forward Speed, Working Depth and Overlay Parameters of Cultivator Tillage on Power Consumption and Draft Force. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 51 (4), 749-756. [In Persian]
 21. Moeinfar, A., Mousavi-Seyedi, S. R., & Kalantari, D. (2014). Influence of tillage depth, penetration angle and forward speed on the soil/thin-blade interaction force. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 16 (1), 69-74.

22. Anpat, R. M., & Raheman, H. (2017). Investigations on power requirement of active-passive combination tillage implement. *Engineering in agriculture, environment and food*, 10 (1), 4-13.
23. Usaborisut, P., Sukcharoenvipharat, W., & Choedkiatphon, S. (2020). Tilling tests of rotary tiller and power harrow after subsoiling. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 19 (6), 391-400.
24. Hirasawa, K., Kataoka, T., & Kubo, T. (2013). Relationship between required power and PTO speed in rotary tiller. *IFAC Proceedings Volumes*, 46 (4), 141-146.
25. Fajardo, A. L., Suministrado, D. C., Peralta, E. K., Bato, P. M., & Paningbatan Jr, E. P. (2014). Force and puddling characteristics of the tilling wheel of float-assisted tillers at different lug angle and shaft speed. *Soil and Tillage Research*, 14 (1), 118-125.
26. Kheiralla, A. F., Yahya, A., Zohadie, M., & Ishak, W. (2004). Modelling of power and energy requirements for tillage implements operating in Serdang sandy clay loam, Malaysia. *Soil and Tillage Research*, 78 (1), 21-34.
27. Mandal, S. K., Bhattacharyya, B., & Mukherjee, S. (2013). Design optimization of rotary tiller blades: a critical review. *Scientific Journal of Pure and Applied Sciences*, 2 (6), 260-269.
28. Mandal, S. K., Bhattacharyya, B., Mukherjee, S., & Karmakar, S. (2014). Soil-Blade interaction of a rotary tiller: Soil bin evaluation. *International journal of sustainable agricultural research*, 1 (3), 58-69.
29. Salokhe, V. M., & Ramalingam, N. (2001). Effects of direction of rotation of a rotary tiller on properties of Bangkok clay soil. *Soil and Tillage Research*, 63 (1-2), 65-74.
30. Matin, M. A., Hossain, M. I., Gathala, M. K., Timsina, J., & Krupnik, T. J. (2021). Optimal design and setting of rotary strip-tiller blades to intensify dry season cropping in Asian wet clay soil conditions. *Soil and Tillage Research*, 20 (7), 104854.
31. Riegler-Nurscher, P., Moitzi, G., Prankl, J., Huber, J., Karner, J., Wagentristsl, H., & Vincze, M. (2020). Machine vision for soil roughness measurement and control of tillage machines during seedbed preparation. *Soil and Tillage Research*, 196, 104351.
32. Mohammadi, F., Maleki, M. R., & Khodaei, J. (2022). Control of variable rate system of a rotary tiller based on real-time measurement of soil surface roughness. *Soil and Tillage Research*, 21 (5), 105216.
33. Danbaba, N., Nkama, I., Badau, M. H., Ukwungwu, M. N., Maji, A. T., Abo, M. E., & Oko, A. O. (2014). Optimization of rice parboiling process for optimum head rice yield: a response surface methodology (RSM) approach. *International Journal of Agriculture and Forestry*, 4 (3), 154-165.
34. Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. John Wiley & Sons. 89 p.
35. Perfect, E., & Kay, B. D. (1994). Statistical characterization of dry aggregate strength using rupture energy. *Soil science society of America Journal*, 58 (6), 1804-1809.
36. Li, Z. Q., Kong, L. Y., Yang, L. F., Zhang, M., Cao, T., Xu, J., & Lei, Y. (2012). Effect of substrate grain size on the growth and morphology of the submersed macrophyte *Vallisneria spiralis* L. *Limnologia*, 42 (1), 81-85.
37. Huang, L., Dong, B. C., Xue, W., Peng, Y. K., Zhang, M. X., & Yu, F. H. (2013). Soil particle heterogeneity affects the growth of a rhizomatous wetland plant. *PLoS One*, 8 (7), 1-6. e69836.
38. Himoud, M. S. (2015). Field study performance of traction of Massey Ferguson tractor. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 32 (3), 955-964.
39. Ranjbarian, S., Askari, M., & Jannatkah, J. (2017). Performance of tractor and tillage implements in clay soil. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 16 (2), 154-162.

