

مدل‌سازی و پیش‌بینی نیروهای وارد بر گاواهن برگرداندار با استفاده از دو روش سطح پاسخ و

شبکه عصبی مصنوعی

محمد رحمتیان^۱، رضا یگانه^{۲*}، محمد امین نعمت‌اللهی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۱

چکیده

در این پژوهش، نیروهای وارد بر گاواهن برگرداندار، به دلیل اهمیت و تأثیرگذاری در برخی موارد همچون انتخاب تراکتور و به‌دست آوردن مدلی دقیق برای پیش‌بینی این نیروها، مورد بررسی قرار گرفتند. اثرات عمق خاک‌ورزی در پنج سطح (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر) و نیز سرعت پیشروی در پنج سطح (۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ متر بر ثانیه) بر نیروهای وارد بر گاواهن برگرداندار (کششی، عمودی و جانبی) به‌صورت شبیه‌سازی شده به روش المان محدود به‌دست آمده و مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. دو روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی نیروها به‌کار گرفته شدند. نتایج مقایسه این دو روش نشان داد که این دو روش به خوبی می‌توانند نیروهای مورد نظر را پیش‌بینی کنند، اما روش شبکه عصبی مصنوعی عملکرد بهتری نسبت به روش دیگر برای پیش‌بینی نیروها داشت. نتایج داده‌های به‌دست آمده حاکی از آن است که افزایش عمق خاک‌ورزی از ۵ تا ۲۵ سانتی‌متر و سرعت پیشروی از ۱ تا ۳ متر بر ثانیه، منجر به افزایش غیر خطی نیروهای کششی، عمودی و جانبی به‌ترتیب به میزان ۶۶/۵۵٪، ۶۸/۴۷٪ و ۶۴/۷۶٪ می‌شود. با استفاده از مدل‌هایی که توسط شبکه عصبی مصنوعی به‌دست آمده که دقت نسبتاً خوبی دارند، می‌توان قبل از ورود به مزرعه با توجه به عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی مد نظر با توجه به بازه‌های تعریف شده برای هر کدام در این پژوهش، مقادیر نیروهای وارد بر گاواهن برگرداندار را بررسی و به‌دست آورد. سپس با استفاده از این نیروها می‌توان به‌طور مثال تراکتوری را انتخاب نمود که توان کشش این گاواهن را در شرایط تعریف شده (عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی) مورد نظر داشته باشد. به همین خاطر توصیه می‌گردد که از مدل شبکه عصبی توسعه داده شده در این پژوهش، استفاده گردد.

واژه‌های کلیدی: سطح پاسخ، شبکه عصبی مصنوعی، شبیه‌سازی، گاواهن برگرداندار، مدل‌سازی

مقدمه

و به دنبال آن کم کردن هزینه‌ها و بالا بردن دقت نسبی نتایج پژوهش، از شبیه‌سازی و مدل‌سازی ریاضی استفاده می‌کنند (Shmulevich et al., 2007; Ibrahmi et al., 2015a). همچنین مطالعه‌های زیادی نشان می‌دهند که مدل‌سازی نیروهای وارد بر خاک‌ورز، راهکاری مناسب برای برآورد عملکرد ابزارهای مختلف خاک‌ورزی و بهبود هندسه‌ی این ابزار می‌باشد (Durairaj and Balasubramanian, 1997; Chen et al., 2013). با این حال، کلید موفقیت در شبیه‌سازی عددی عملیات خاک‌ورزی، شبیه‌سازی دقیق ابزار مورد نظر بر اساس مفروضات درست و همچنین روش‌های مرتبط است. پیش‌بینی نیروهای وارد بر ابزارهای خاک‌ورز نقش مؤثری در طراحی ابزار خاک‌ورزی دارد. جمع‌آوری داده‌های مربوط به نیروهای وارد بر ابزارهای خاک‌ورزی تحت شرایط مزرعه‌ای متفاوت، یک کار زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد. بنابراین پیش‌بینی نیروهای ابزار خاک‌ورزی به‌منظور دستیابی به عملکرد بهتر ابزار برای طراح و کاربر بسیار مهم می‌باشد. نیروهای وارد بر ابزار خاک‌ورز تابعی از ویژگی‌های خاک، عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی ابزار می‌باشد (Arvidsson et al., 2004). تحقیق‌های زیادی در زمینه پیش‌بینی شرایط عملیاتی ابزار خاک‌ورز به روش‌های تجربی (مزرعه و انباره خاک) و ریاضی (شبیه‌سازی و مدل‌سازی) انجام گرفته است. به‌طور

خاک‌ورزی یک عملیات بسیار مهم و تأثیرگذار در میزان رشد و بهره‌وری محصولات کشاورزی می‌باشد. لازم است برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک، هوادهی بهتر، نفوذپذیری و توسعه ریشه در عملیات خاک‌ورزی شرایطی را فراهم نمود. با این حال در خاک‌ورزی اولیه، به‌خصوص زمان استفاده از گاواهن برگرداندار، نیاز به انرژی و زمان زیادی دارد که ممکن است استفاده از آن برای پژوهشگران در پژوهش‌های خود، زمان‌بر و پرهزینه باشد (Ibrahmi et al., 2015b). برخی از پژوهشگران برای آزمایش بر روی شرایط کار از آزمایش‌های فیزیکی بهره می‌برند (Sahu and Raheman, 2006; Al-Suhaibani and Ghaly, 2010)، که در چنین پژوهش‌هایی صحت نتایج به‌دست آمده وابسته به دقت ابزار اندازه‌گیری دارد. در صورتی که برخی دیگر از پژوهشگران، به منظور کاهش زمان تحقیق

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ایلام

۳- استادیار بخش مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز

* - نویسنده مسئول: (Email: r.yeganeh@ilam.ac.ir)

DOI: 10.22067/jam.v10i2.75672

شد و این سه روش از نظر دقت و کارایی با یکدیگر مقایسه گردیدند. نتایج نشان داد که سه روش مذکور به خوبی می‌توانند پارامترهای مربوط به مکانیک خاک را پیش‌بینی کنند، اما روش پتانسیل بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) دقت و کارایی مناسب‌تری نسبت به دو روش دیگر داشت (Hosseini et al., 2016). همچنین در پژوهش دیگری از روش سطح پاسخ برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی اثر هندسه بال بر نیروی کششی و عمودی خاک‌ورز قلمی بالدار استفاده شد. در این پژوهش تیمارهای مورد نظر شامل عمق خاک‌ورزی، زاویه تمایل و زاویه حمله بال بود. مقادیر بهینه برای این تیمارها به ترتیب ۵ سانتی‌متر، ۱۱/۱۰ درجه و ۱۹/۴۶ درجه گزارش گردید (Salar and Karparvarfar, 2017). در پژوهشی نیز برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی شرایط تیغه قلمی فولادی با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره، مدل‌هایی به دست آمد و نشان داده شد که مقادیر بهینه‌ی سرعت پیشروی، زاویه حمله و رطوبت خاک به ترتیب ۵ کیلومتر بر ساعت، ۳۶ درجه و ۱۴/۸ درصد رطوبت وزن خشک بودند (Rahmatian et al., 2018). در تحقیق‌هایی که ذکر شد به راحتی می‌توان اهمیت بالای شرایط کاری ابزارهای خاک‌ورز و نیروهایی که به این ابزارها وارد می‌گردد را درک نمود. همچنین نزدیک بودن نتایج روش‌های تجربی با نتایجی که از روش‌های عددی به دست آمده، نشان از بالا بودن دقت برخی از روش‌های عددی برای استفاده در پژوهش‌ها و طراحی ادوات خاک‌ورز می‌باشد. با توجه به استفاده‌ی فراوان از گاوآهن برگردان‌دار در خاک‌ورزی مرسوم و بالا بودن هزینه‌ی تحقیق‌های تجربی و زمان‌بر بودن آن‌ها و همچنین با استفاده از نتایجی که از پژوهش‌های گذشته به دست آمد، لزوم به کار بردن روش‌های عددی در این امور نمایان است. به علاوه با توجه به این‌که روش‌های عددی، کمتر برای گاوآهن برگردان‌دار مورد استفاده قرار گرفته است، به همین دلیل، هدف از این پژوهش ارائه راه‌حلی برای طراحی گاوآهن برگردان‌دار در نرم‌افزارهای طراحی، به دست آوردن معادلاتی به روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی به منظور پیش‌بینی نیروهای وارد بر گاوآهن برگردان‌دار اعم از مقاومت کششی، نیروی عمودی و نیروی جانبی با استفاده از تیمارهای عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی و مقایسه و انتخاب بهترین روش از بین دو روش مورد نظر در این پژوهش می‌باشد.

مواد و روش‌ها

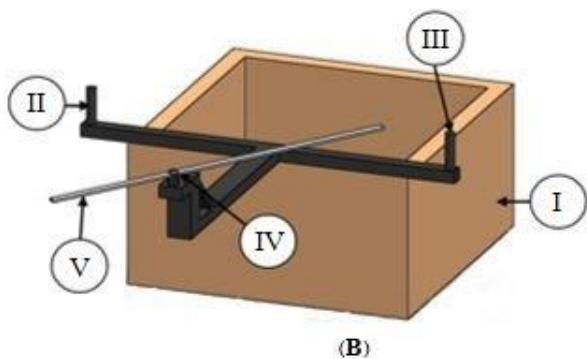
در این پژوهش، متغیرهای مستقل که به عنوان تیمارهای آزمایش در نظر گرفته شدند عبارت از پنج سطح سرعت پیشروی (۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ متر بر ثانیه) و پنج سطح عمق خاک‌ورزی (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر) و همچنین متغیرهای وابسته نیز عبارت از نیروی کششی، نیروی عمودی، نیروی جانبی وارد بر تیغه بر حسب کیلونیوتن بودند.

مثال در پژوهش‌هایی که به روش تجربی انجام گرفته‌اند تیمارهایی نظیر عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی به عنوان متغیرهای تأثیرگذار بر نیروهای وارد بر گاوآهن‌ها، بیان کرده‌اند و نشان داده‌اند که با افزایش عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی، نیروهای وارد بر گاوآهن نیز افزایش می‌یابد (Sahu and Raheman, 2006; Al-Suhaibani and Ghaly, 2010; Akbarnia et al., 2014). همچنین تعدادی از پژوهشگران نیز برهم‌کنش خاک و تیغه را با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزارهای مورد نظر شبیه‌سازی کرده و تیمارهای عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی را در نظر گرفته و دقت روش‌های شبیه‌سازی را بررسی نمودند (Abo-Elnor et al., 2004; Hosseini et al., 2016; Salar and Karparvarfar, 2017; Rahmatian et al., 2018). در پژوهشی برهم‌کنش خاک و تیغه با استفاده از روش المان محدود در نرم‌افزار Abaqus شبیه‌سازی و رفتار خاک، الاستیک در نظر گرفته شد. نتایج این پژوهش نشان داد که تعداد المان‌ها و عرض جعبه خاک مدل شده، بسیار مؤثر در نیروهای خروجی از نرم‌افزار می‌باشد (Abo-Elnor et al., 2004). در پژوهشی دیگر نشان داده شد که سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی به طور معنی‌داری بر مقاومت کششی ابزار خاک‌ورز مرکب مؤثر بوده و با افزایش عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی، مقاومت کششی نیز افزایش یافت. افزایش حجم خاک جابه‌جا شده و شتاب وارده به خاک، دلیل افزایش مقاومت کششی گزارش شد (Sahu and Raheman, 2006). همچنین در پژوهش دیگری، تأثیر سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی بر نیروی کششی و عمودی یک ابزار خاک‌ورز مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش عمق خاک‌ورزی و یا سرعت پیشروی، مقاومت کششی و نیروی عمودی نیز افزایش یافت (Al-Suhaibani and Ghaly, 2010). در پژوهشی نیز اثر زوایای گاوآهن برگردان‌دار بر مقاومت کششی آن به روش ریاضی المان محدود با استفاده از نرم‌افزار Abaqus و روش تجربی در انباره خاک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از روش ریاضی مطابقت خوبی با روش تجربی داشت و روش المان محدود به خوبی توانست مقاومت کششی گاوآهن برگردان‌دار را پیش‌بینی کند (Bentaher et al., 2013). در پژوهش دیگری، اثر عمق کار و سرعت پیشروی بر مقاومت کششی ابزار خاک‌ورز باریک مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش گزارش شد که اثر عمق کار و سرعت پیشروی بر مقاومت کششی معنادار بوده و با افزایش آن‌ها، مقاومت کششی خاک‌ورز نیز افزایش یافت (Akbarnia et al., 2014). پژوهش‌های فراوانی وجود دارد که از روش مدل‌سازی ریاضی برای پیش‌بینی مقادیر مورد نظر بهره گرفته شده است. در پژوهشی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای مربوط به مقاومت مکانیکی خاک از روش‌های رگرسیون چند متغیره، الگوریتم ژنتیکی و پتانسیل بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) استفاده

خیش با جنس صفحه برگردان St37-2، شاسی ثابت، اتصال از نوع سوار و وزن کل ۵۲۰ kg بود. برای شبیه سازی صفحه برگردان از مختصات هندسی نقاط گوناگونی از آن و نیز ترسیم آن در نرم افزار طراحی Solidworks 2016 استفاده گردید. به منظور به دست آوردن مختصات هندسی نقاط مد نظر، یک دستگاه اندازه گیری طراحی و ساخته شد (شکل ۱- A). نحوه ی کار دستگاه بر این اصل استوار بود که مختصات هندسی یک نقطه را می توان با توجه به فاصله ی آن از سه نقطه ی معین در فضا که یکی از آنها به عنوان مبدا در نظر گرفته می شود، به دست آورد که البته باید مختصات هندسی آن سه نقطه نیز معلوم باشند (Miron *et al.*, 2002). دستگاهی که به این منظور طراحی و ساخته شد، سه رأس ثابت داشت که این سه رأس همان سه نقطه ی فضایی معلوم بودند. یک خطکش مدرج نیز بر روی دستگاه تعبیه شده بود که با توجه به طرح خاص خود قابلیت اندازه گیری فاصله ی هر نقطه مجهول مورد نیاز نسبت به هر کدام از سه نقطه ی معلوم را داشت (شکل ۱- B).

شبیه سازی صفحه برگردان گاواهن برگرداندار

مدل های گوناگونی برای صفحه برگردان از جمله مدل های استوانه ای، نیمه استوانه ای، پیچیده و نیمه پیچیده وجود دارد. در بین این صفحه برگردان ها، صفحه برگردان استوانه ای به دلیل این که دارای انحنای متوسطی در طول خود می باشد، خاک راحت تر بر روی آن حرکت کرده و نیروی کمتری از طرف خاک به صفحه برگردان وارد می گردد که موجب حرکت راحت تر تراکتور در مزرعه و همچنین انجام بهتر برگردان شدن خاک می شود (Srivastava, 2006). همچنین صفحه برگردان های استوانه نیز می توانند در عمق بیشتری نسبت به دیگر مدل های صفحه برگردان، عملیات خاک ورزی را انجام دهند (McKyes, 1985; Srivastava, 2006). به همین دلیل این نوع صفحه برگردان در بین کشاورزان از محبوبیت بالایی برخوردار بوده و از آن در بیشتر عملیات های خاک ورزی مرسوم استفاده می شود (Ucguil *et al.*, 2017). به همین خاطر، ابتدا برای انجام شبیه سازی صفحه برگردان، گاواهن برگرداندار با صفحه برگردان استوانه ای ساخت شرکت آلپلر^۱ کشور ترکیه انتخاب شد. این گاواهن دارای سه



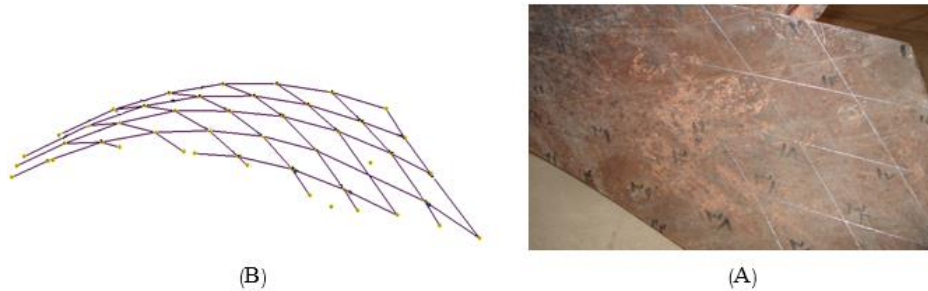
شکل ۱- A- اندازه گیری مختصات هندسی فضایی، B- شماتیک دستگاه اندازه گیری مختصات هندسی فضایی (I: پایه ثابت، II، III و IV: نقاط فضایی معلوم، V: خطکش مدرج)

Fig.1. A- Spatial geometric coordinate device, B- Schematic of spatial geometric coordinate measuring device (I: Fixed base, II, III and IV: Known spatial points. V: Graded ruler)

و دسته ی دیگر هم موازی با لبه ی بالایی صفحه برگردان به عنوان مسیرهای گذرا، به صورت شطرنجی رسم شد. محل تقاطع این خطها با هم، همان نقاط مجهول مورد استفاده در ترسیم صفحه برگردان شدند (شکل ۲- A). برای به دست آوردن مختصات نقاط مجهول، دستگاه اندازه گیری بر روی یک پایه ی سنگین ثابت شد (شکل ۱- B, A) و فاصله ی هر نقطه ی مجهول از صفحه برگردان به طور جداگانه از هر کدام از سه نقطه ی ثابت بر روی دستگاه اندازه گیری به دست آمد. با توجه به این که مختصات خود سه نقطه ی ثابت بر روی دستگاه معلوم بود، با داشتن فاصله ی نقاط از سه نقطه ی ثابت، مختصات هندسی نقاط مجهول قابل محاسبه شد.

با توجه به روش پیش گرفته شده، هر تعداد نقطه ی تصادفی را می توان برای ترسیم رویه صفحه برگردان مورد استفاده قرار داد. اما با توجه به نوع نرم افزار مورد استفاده، برای ساده تر کردن مراحل شبیه سازی لازم است نقاط به نحوی انتخاب شوند که منحنی های حاصل از این نقاط، در نهایت متشکل از چند مقطع عرضی^۲ و چند مسیرگذرا^۳ از این مقاطع باشند. به همین منظور، ابتدا در خیش مورد نظر، یک دسته خط موازی با لبه ی پیشانی به عنوان مقطع های عرضی

1- Alpler company
2- Section
3- Rail



شکل ۲- A- مشخص کردن نقاط مجهول بر روی صفحه برگردان، B- صفحه شطرنجی به دست آمده در نرم‌افزار طراحی
Fig.2. A- Specify the passive points on the moldboard, B- The grid plate obtained in the design software

St37-2 بود، استخراج و استفاده گردید (AISI Standard, 2011). برای به دست آوردن چگالی ظاهری گاوآهن مورد نظر، وزن آن با استفاده از ترازوی باسکولی مدل اعتماد ۳۰۱ ساخت ایران و حجم گاوآهن نیز با استفاده از نرم‌افزار Solidworks2016 که برای شبیه‌سازی گاوآهن از آن بهره گرفته شده بود، اندازه‌گیری گردیدند. ویژگی‌های مکانیکی گاوآهن مورد استفاده در این پژوهش شامل چگالی ظاهری (kg.cm^{-3})، تنش نهایی (MPa)، تنش تسلیم (MPa)، مدول کشسانی (GPa) و نسبت پواسون به ترتیب ۷۸۶۰، ۲۳۵، ۱۹۸، ۲۰۰ و ۰/۳۰ بود.

جعبه‌ی خاک در نرم‌افزار، به طول ۵ متر، عرض ۲ متر و ارتفاع ۱ متر شبیه‌سازی شد. خاک با مدل کشسان خمیری^۲ دراکر-پراگر، با معیار برش خطی تعریف شد (Shmulevich et al., 2007; Li et

al., 2013). این مدل را می‌توان به صورت رابطه (۱) بیان نمود:

$$F = t - p \tan \xi - d \quad (1)$$

که در آن F (kPa)، t (kPa)، p (kPa)، ξ (°) و d (kPa) به ترتیب تابع تسلیم، تنش انحرافی، تنش نرمال، زاویه اصطکاک داخلی و هم‌چسبی ذرات ماده می‌باشند. همچنین تنش‌های نرمال (p) و انحرافی (t) به صورت رابطه‌های زیر بیان می‌شوند (Ibrahmi et al., 2015a; Jafari and TavakoliHashjin, 2016).

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2)$$

$$t = \frac{1}{2}q \left[1 + \frac{1}{K} - \left(1 - \frac{1}{K} \right) \left(\frac{r}{q} \right)^3 \right] \quad (3)$$

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (4)$$

$$r^3 = -(\sigma_1 - \sigma_3)^3 = -q^3 \quad (5)$$

که در رابطه (۳)، K عبارت از نسبت تنش تسلیم فشاری به تنش تسلیم در آزمون تست سه محوری می‌باشد ($0.778 \leq K \leq 1$) (ABAQUS, 2016). همچنین در روابط (۳)، (۴) و (۵)، q تنش معادل وون مایسز و r^3 نیز عکس تنش انحرافی می‌باشند.

نقطه‌های به دست آمده از صفحه برگردان در قسمت سه‌بعدی نرم‌افزار طراحی وارد شدند. با توجه به این که در زمان انتخاب نقاط نماینده‌ی صفحه، روند خاصی در پیش گرفته شده بود، هر تعداد از آن‌ها بر روی یک منحنی قرار داشتند. زمانی که منحنی‌ها به طور کامل رسم شدند، یک صفحه‌ی شطرنجی شکل نیز در نرم‌افزار به وجود آمد (شکل ۲-B). در نرم‌افزار طراحی مورد استفاده در این پژوهش، خطوط موازی پیشانی که به عنوان مقطع عرضی بودند، حرکت داده شدند و ضمن عبور از بقیه‌ی خطوط دسته‌ی خود، از مسیرهای گذرا که موازی با لبه بالایی صفحه برگردان بودند، به عنوان راهنما استفاده کرده و یک صفحه‌ی سه‌بعدی که همان صفحه برگردان مورد نظر بود، رسم شد (شکل ۳-A).

شبیه‌سازی عملیات خاک‌ورزی

یکی از دلایلی که از فرآیند شبیه‌سازی در این پژوهش استفاده شد، عدم وجود امکاناتی بود که هم‌زمان بتوان نیروی کششی، عمودی و جانبی وارد بر گاوآهن برگرداندار را به دست آورد و همچنین دلیل دیگر این که، طبق پژوهش‌های گذشته، نتایجی که از شبیه‌سازی عددی به دست می‌آید با درصد اختلاف ناچیزی، نزدیک به نتایج آزمایش‌های تجربی در مزرعه یا انباره خاک می‌باشند که این کار مستلزم شبیه‌سازی دقیق ابزارها و عوامل تأثیرگذار بر عوامل در نظر گرفته شده می‌باشد (Abo-Elnor et al., 2004; Bentaher et al., 2013; Ibrahmi et al., 2015a; Ucgai et al., 2017). بر اساس این دلایل، در این تحقیق برای شبیه‌سازی برهم‌کنش گاوآهن برگرداندار و خاک از روش اجزای محدود^۱ در نرم‌افزار ABAQUS 2016 استفاده شد. برای شروع کار، تیغه‌ی شبیه‌سازی شده وارد نرم‌افزار Abaqus گردید و برای کم کردن محاسبات به آن قید صلب داده شد تا از تغییر حالت‌های گاوآهن در هنگام حرکت در داخل خاک صرف نظر شود. نوک تیغه نیز نوان نقطه مرجع در نظر گرفته شد. برای معرفی مواد به کار رفته در صفحه برگردان گاوآهن برگرداندار شبیه‌سازی شده در این پژوهش، از استاندارد مورد نظر، خواص مکانیکی جنس صفحه برگردان گاوآهن مورد نظر که از جنس

2- Elasto-plastic

1- Finite element method (FEM)

پارامترهای مورد استفاده برای شبیه سازی خاک در این پژوهش که توسط (Ibrahmi et al., 2015a) ارائه شده بودند، در جدول ۳ نشان داده شده اند.

جدول ۳- ویژگی های فیزیکی و مکانیکی به کار برده شده در شبیه سازی خاک
Table 3- Physical and mechanical properties used in soil simulation

ویژگی ها Properties	واحد Unit	مقدار Value
مدول کشسانی Young modulus	MPa	7.50
تنش پیش تراکمی Precompression stress	MPa	0.14
نسبت پواسون Poison's ratio	—	0.30
چگالی ظاهری Density	kg.m ⁻³	1.60
زاویه اصطکاک داخلی Internal friction angle	degree	44
هم چسبی ذرات خاک Cohesion	kPa	4.08
زاویه اصطکاک داخلی دراکر-پراگر Internal friction angle Drucker-Prager	degree	30.25
نسبت تنش جریان Flow stress ratio	—	1
زاویه اتساع Dilatation angle	degree	0

به دلیل این که گاوآهن در حال حرکت درون خاک است و تنش های بین خاک و گاوآهن در هر زمان از جابه جایی می تواند متفاوت باشد، از حل کننده دینامیکی^۳ برای استفاده از اثر زمان بر نیروها و تنش ها استفاده گردید (Jafari and TavakoliHashjin, 2016) و زمان آن ۶ ثانیه در نظر گرفته شد. اصطکاک بین خاک و ابزار خاک ورز نیز با رفتار مماسی و نوع تماس عمومی با ضریب اصطکاک^۴ ۰/۳۸ تعریف شد (Ibrahmi et al., 2015a). زمانی که اصطکاک بین یک جسم صلب و یک جسم تغییر شکل پذیر تعریف می شود، جسم صلب به عنوان سطح پایه و جسم تغییر شکل پذیر به عنوان هدف انتخاب می گردد (Abo-Elnor, 2004; Ibrahmi et al., 2015a; Jafari and TavakoliHashjin, 2016). به همین دلیل چون هدف، فرو رفتن ابزار در خاک بود، لذا برای سطوحی از ابزار که در تماس مداوم با خاک قرار داشتند، اصطکاک سطح به سطح^۵ استفاده شد. به نحوی که سطوحی از گاوآهن به عنوان سطح پایه و بخشی از خاک که در تماس با گاوآهن قرار داشت، به عنوان هدف انتخاب گردید. شرایط مرزی^۱ در این مسئله به این صورت

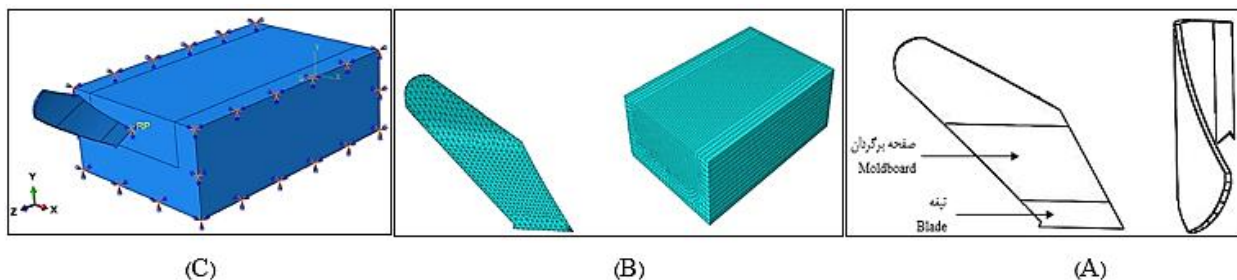
با توجه به گسیخته شدن خاک هنگام عبور گاوآهن و جهت جلوگیری از انباشته شدن المان ها در جلوی گاوآهن و پیغام خطا از نرم افزار، از آسیب برشی^۱ در تعریف خصوصیات خاک استفاده گردید. در این بخش، آستانه جابه جایی در شکست تعریف شد که نرم افزار با رسیدن کرنش شکست المان های خاک به مقدار بیشینه، آن ها را به صورت خودکار از تحلیل حذف می نمود. به منظور المان بندی خاک و گاوآهن برگرداندار، به دلیل منظم بودن شکل جعبه خاک از المان C3D8R که یک المان مکعبی سه بعدی می باشد، برای المان بندی آن استفاده گردید (شکل ۳-B). در بخش هایی از خاک که پیش بینی می شد در اثر تماس با ابزار خاک ورز در معرض گسیختگی قرار گیرند، شبکه بندی ریزتر^۲ نیز انجام شد. همچنین برای المان بندی گاوآهن برگرداندار به دلیل نامنظم بودن شکل آن، از المان C3D10 که یک المان هرمی سه بعدی می باشد، استفاده گردید (شکل ۳-B). برای خاک ۶۹۰۷۵ المان و برای تیغه ۲۶۷۱ المان به وجود آمد. پس از المان بندی، مونتاژ ابزار و خاک انجام شد و موقعیت آن ها طوری انتخاب گردید که گاوآهن برگرداندار در ابتدای جعبه خاک و در عمق مورد نظر قرار گرفت (شکل ۳-C).

3- Dynamic Explicit
 4- Friction coefficient
 5- Surface to surface

1- Shear damage
 2- Node region

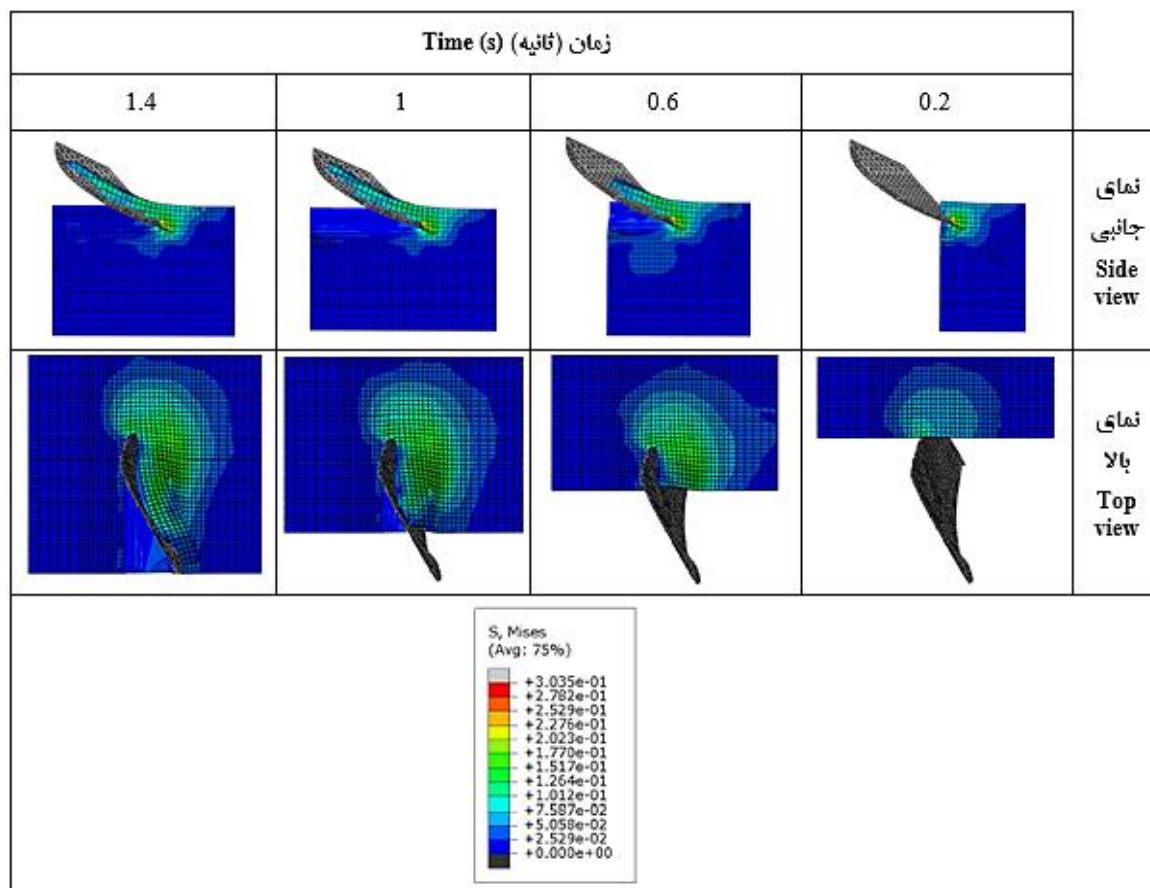
پس از طی عملیات شبیه‌سازی برهم‌کنش گاواهن برگرداندار و خاک، نتایج نیروهای پیش‌بینی شده وارد بر گاواهن برگرداندار در حین انجام عملیات خاک‌ورزی استخراج گردید.

اعمال شدند که وجه پایینی و وجوه جانبی خاک در تمامی جهت‌ها ثابت گردید. نقطه مرجع ابزار خاک‌ورز در تمامی جهت‌ها به غیر از جهت Z که جهت حرکت ابزار بود، نیز ثابت شد (شکل ۳-۱). پس از انجام تمام مراحل ذکر شده، برنامه مورد نظر اجرا گردید (شکل ۴) و



شکل ۳-۱- صفحه برگردان به‌دست آمده در نرم‌افزار طراحی، B- المان‌بندی خاک و گاواهن برگرداندار، C- مونتاژ گاواهن برگرداندار و خاک و قیدهای ایجاد شده

Fig.3. A- Moldboard obtained in the design software, B- Element of soil and moldboard plough, C- Assembly of moldboard plough and soil and constraints created



شکل ۴- اجرای عملیات شبیه‌سازی برهم‌کنش گاواهن برگرداندار و خاک و همچنین نمایش ترازهای تنش
Fig.4. Simulation of moldboard plough and soil interaction, as well as display of stress levels

شبیه سازی شده انجام گرفته بود، عملاً تکراری برای آزمایش های مد نظر وجود نخواهد داشت. بنابراین می بایست تمام داده های موجود برای مدل سازی به کار گرفته می شدند. به همین خاطر در روش سطح پاسخ از طرح Historical Data استفاده گردید. با توجه به این که در روش سطح پاسخ برای مدل کردن هر یک از متغیرهای آزمایشی سه سطح و یا بیشتر از آن متغیر نیاز است (Mostafaei et al., 2016)، در این پژوهش نیز از ابتدا برای هر متغیر آزمایشی، پنج سطح در نظر گرفته شد. پس از وارد کردن سطوح و متغیرهای آزمایشی، داده های به دست آمده از شبیه سازی عملیات خاک ورزی گاوآهن برگرداندار به ترتیب در نرم افزار وارد شدند. بر اساس شاخص های آماری نظیر ضریب تعیین (R^2) ، ضریب تعیین معادل (R^2a) و ضریب تعیین جزئی (R^2p) که از داده های وارد شده در نرم افزار به دست آمدند، بهترین مدل از بین مدل های خطی، دوفاکتوره و درجه دوم برای مدل سازی نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار به روش سطح پاسخ انتخاب گردید. سپس به صورت کلی معادله ای که از طرح مورد نظر برای هر یک از نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار به دست آمد به صورت رابطه (۱۰) بود.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^3 \beta_{ij} X_i X_j \quad (10)$$

در این رابطه، y پاسخ پیش بینی شده (متغیرهای وابسته)، β_0 ضریب ثابت، β_i ضریب خطی برای تیمارهای آزمایشی، β_{ii} ضریب تأثیر درجه دوم، β_{ij} ضریب تأثیر متقابل و X_i و X_j متغیرهای مستقل می باشند (Mostafaei et al., 2016). رابطه ی بین متغیرهای مستقل و اثرات متقابل آن ها در مدل با متغیرهای وابسته به کمک آنالیز واریانس به طور جداگانه برای هر متغیر وابسته، مورد بررسی قرار گرفتند و صفاتی که معنی دار نشده بودند، از روند مدل سازی حذف و بقیه صفات معنی دار شده برای مدل سازی نیروهای مورد نظر، در مدل مورد استفاده قرار گرفتند. پس از انجام تمام مراحل، مدل ها برای نیروهای کششی، عمودی و جانبی به طور مجزا به دست آمدند.

مدل سازی به روش شبکه عصبی مصنوعی

روش دیگری که برای مدل سازی در این پژوهش به کار گرفته شد، روش شبکه عصبی مصنوعی بود. جهت مدل سازی به روش شبکه عصبی مصنوعی، پارامترهای ورودی (عمق خاک ورزی و سرعت پیشروی) و خروجی (نیروی های کششی، عمودی و جانبی) در این پژوهش، از یک شبکه عصبی چند لایه^۵ به نام شبکه عصبی انتشار برگشتی^۶ استفاده شد. پس از انجام محاسبات با ساختارهای

پارامترهای توصیفی آماری

برای بررسی آماری داده های به دست آمده از شبیه سازی عملیات خاک ورزی گاوآهن برگرداندار تحت تأثیر تیمارهای مورد نظر در این پژوهش، از برخی پارامترهای توصیفی آماری نظیر میانگین، انحراف معیار، ضریب تغییرات و ضریب غیر یکنواختی استفاده شد. این پارامترها دیدی کلی از داده های به دست آمده و همچنین صحت و دقت آن ها را از نظر آماری بیان می کنند. پارامترهای آماری میانگین، انحراف معیار، ضریب تغییرات و ضریب غیر یکنواختی در روابط (۶) تا (۹) بیان شده اند (Shafaei and Kamgar, 2017).

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} F_i \quad (6)$$

$$SD = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^{i=N} (F_i - M)^2} \quad (7)$$

$$CV = \frac{SD}{M} \times 100 \quad (8)$$

$$CNU = \left[\frac{1}{M} (F_{max} - F_{min}) \right] \times 100 \quad (9)$$

در روابط (۶) تا (۹)، F_i ، N ، M ، SD ، CV ، CNU ، F_{max} و F_{min} به ترتیب میانگین داده ها، تعداد داده ها، نیروی به دست آمده (نیروی کششی، نیروی عمودی یا نیروی جانبی)، انحراف معیار، ضریب تغییرات، ضریب غیر یکنواختی^۱، کمترین مقدار نیرو و بیشترین مقدار نیرو می باشند.

مدل سازی نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار

در این قسمت برای مدل سازی نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار، از دو روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. به دلیل این که این دو روش، توانایی بالایی برای پیش بینی روابط خطی و غیر خطی در بین متغیرهای مورد نظر دارند، می توان آن ها را از نظر کاربردی با یکدیگر مقایسه نمود (Maran and Priya, 2015). به همین دلیل، توانایی دو روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی برای مدل سازی و پیش بینی نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار سنجیده و سپس با یکدیگر مقایسه شدند و در آخر مناسب ترین روش از نظر بیشترین توانایی برای پیش بینی متغیرها، انتخاب گردید.

مدل سازی به روش سطح پاسخ

یکی از روش هایی که برای مدل سازی متغیرهای آزمایشی در این پژوهش استفاده شد، روش سطح پاسخ^۲ بود. این روش یکی از روش های طراحی آزمایش می باشد (Mostafaei et al., 2016). برای بهره گیری از این روش از نرم افزار Design-Expert 7.0.0 در این پژوهش استفاده شد. به دلیل این که عملیات خاک ورزی به صورت

3- Adjusted determination of coefficient

4- Partial determination of coefficient

5- Multi layer perceptron

6- Neural network of back propagation

1- Ccoefficient of non-uniformity

2- Response surface methodology (RSM)

در این روابط $F_{pre,i}$ ، $F_{act,i}$ ، \bar{F} به ترتیب نیروی واقعی وارد بر گاواهن برگرداندار، نیروی پیش‌بینی شده وارد بر گاواهن برگرداندار و میانگین نیروهای مورد نظر می‌باشند. برای انتخاب بهترین روش از بین روش‌های سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی نیروهای کششی، عمودی و جانبی وارد بر گاواهن برگرداندار، مقایسه‌هایی بین معیارهای عملکردی آماری که برای تمام مدل‌ها به دست آمده بود، انجام گرفت. بهترین مدل با بالاترین توانایی در بین مدل‌های به دست آمده در این پژوهش برای پیش‌بینی نیروهای وارد بر گاواهن برگرداندار بر اساس بالاترین ضریب تعیین (R^2) و کمترین مقدار RMSE و MRDM یافت شد.

نتایج و بحث

توصیف‌های آماری

در جدول ۴، پارامترهای توصیفی آماری برای نیروهای وارد بر گاواهن برگرداندار به دست آمده در شبیه‌سازی عملیات خاک‌ورزی نشان داده شده‌اند که در آن، حداقل و حداکثر مقدار نیروهای وارد بر گاواهن برگرداندار به ترتیب در پایین‌ترین سطح (عمق خاک‌ورزی ۵ سانتی‌متر و سرعت پیشروی ۱ متر بر ثانیه) و بالاترین سطح (عمق خاک‌ورزی ۲۵ سانتی‌متر و سرعت پیشروی ۳ متر بر ثانیه) از متغیرهای آزمایشی اعمال شده، به دست آمدند. مقادیر ضریب تغییرات و ضریب غیر یکنواختی نشان می‌دهند که داده‌ها پراکندگی زیادی از متوسط خود نداشته و نیروهای وارد بر گاواهن برگرداندار، تحت تأثیر سطوح مرتبط با عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی قرار داشته‌اند.

مدل‌های به دست آمده به روش سطح پاسخ

در جدول ۵، شاخص‌های آماری که برای انتخاب بهترین مدل رگرسیونی به کار گرفته شد، نشان داده شده‌اند. بر طبق این جدول، سه نوع مدل خطی، دو فاکتوره و درجه دوم تعریف شده است که بر اساس شاخص‌های آماری R^2 ، R^2_a و R^2_p با هم مقایسه گردیده‌اند. بر اساس نتایجی که از شاخص‌های آماری به دست آمد، تمام این شاخص‌ها برای مدل درجه دوم در بین دیگر مدل‌های موجود در جدول ۵، دارای مقدار حداکثر بودند. به همین دلیل مدل درجه دوم برای مدل‌سازی و همچنین پیش‌بینی نیروهای وارد بر گاواهن برگرداندار طبق شاخص‌های آماری، از عملکردی بهتری برخوردار بود که در بین دیگر مدل‌ها برای مدل‌سازی انتخاب گردید.

در جدول ۶، تجزیه واریانس تمام متغیرهای مورد استفاده در مدل درجه دوم با نیروهای وارد بر گاواهن برگرداندار نمایش داده شده است. طبق این جدول، برای نیروی کششی، اثر متقابل عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی و برای نیروی جانبی نیز مجذور سرعت پیشروی معنی‌دار نشده است که از روند مدل‌سازی برای نیروهای مذکور به دلیل معنی‌دار نبودن، حذف گردیدند.

مختلف شبکه عصبی و محاسبه خطا، آموزش شبکه عصبی انتشار برگشتی با دو لایه پنهان که تابع انتقال و الگوریتم بهینه‌سازی آن به ترتیب سیگموئیدی^۱ و لونیگ-مارکوارت^۲ بودند، انجام شد. در لایه پنهان اول و دوم به ترتیب ۶ و ۸ نورون به کار برده شد. ساختار کلی شبکه انتشار برگشتی به کار گرفته شده در این پژوهش به صورت طرح‌واره در شکل ۵ نشان داده شده است.

شبکه بر اساس دو لایه پنهان با دو متغیر ورودی و سه پارامتر خروجی توسعه داده شد. داده‌های ورودی به صورت یکپارچه به شبکه ارائه شدند و به منظور کاهش خطای کلی، شبکه انتشار برگشتی چند بار تکرار شد (Bishop, 2006). چندین پارامتر وجود دارد که می‌تواند کارایی شبکه را برای پیش‌بینی، تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین برای دستیابی به بهترین ساختار شبکه با بیشترین توان پیش‌بینی، ترکیبی از پارامترها (ورودی و خروجی توابع انتقال، تعداد نورون‌ها در لایه پنهان و تعداد دوره‌های آموزش شبکه) با استفاده از روش آزمون و خطا تنظیم شد (Shafaei et al., 2018). جهت اعتبارسنجی مدل از روش اعتبارسنجی متقابل^۳ (ضربدری) چند لایه‌ای ($k=5$) استفاده گردید.

ارزیابی عملکرد مدل‌های به دست آمده و انتخاب بهترین مدل

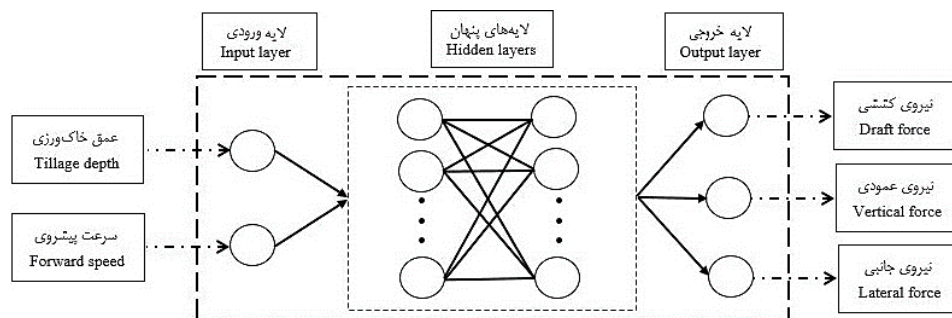
مدل‌هایی که در این پژوهش برای پیش‌بینی نیروهای وارد بر گاواهن برگرداندار به دست آمد، با استفاده از معیارهای عملکردی آماری مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای تعیین دقت مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل رگرسیونی از ضریب تعیین (R^2) بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده، استفاده شد (رابطه ۱۱). همچنین برای تعیین میانگین مطلق و نسبی خطای مدل‌سازی از ریشه میانگین مربعات خطای تخمین زده شده ($RMSE^4$) و میانگین خطای تخمین زده شده ($MRDM^5$) استفاده گردید (روابط (۱۲) و (۱۳)) (Hosseini et al., 2016; Mostafaei et al., 2016; Shafaei et al., 2018).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (F_{act,i} - \bar{F}) - \sum_{i=1}^N (F_{act,i} - F_{pre,i})}{\sum_{i=1}^N (F_{act,i} - \bar{F})} \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_{pre,i} - F_{act,i})^2} \quad (12)$$

$$MRDM = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{|F_{pre,i} - F_{act,i}|}{F_{act,i}} \right) \right] \times 100 \quad (13)$$

- 1- Sigmoid function
- 2- Levenberg-Marquardt
- 3- K-fold cross validation
- 4- Root mean square error
- 5- Mean relative deviation modulus



شکل ۵- طرح‌واره کلی از ساختار شبکه عصبی مصنوعی به کار رفته در این پژوهش

Fig.5. The general scheme of the artificial neural network structure used in this research

جدول ۴- پارامترهای توصیفی آماری به دست آمده از داده‌های شبیه‌سازی عملیات خاک‌ورزی

Table 4- Descriptive statistics parameters obtained from simulation data of tillage operations

نیروها Forces	میانگین داده‌ها Mean of used data (kN)	انحراف معیار Standard deviation (kN)	کمترین مقدار Minimum value (kN)	بیشترین مقدار Maximum value (kN)	ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)	ضریب غیر یکنواختی Coefficient of non-uniformity (%)
نیروی کششی Draft force	9.13	3.21	4.89	14.62	4.09	106.57
نیروی عمودی Vertical force	6.89	2.47	4.02	12.75	2.19	126.71
نیروی جانبی Lateral force	4.36	1.32	2.59	7.35	3.20	109.17

جدول ۵- نتایج شاخص‌های آماری برای انتخاب بهترین مدل در بین مدل‌های روش سطح پاسخ

Table 5- Statistical index results for choice best model between response surface methodology models

مدل‌ها Models	نیروی کششی Draft force			نیروی عمودی Vertical force			نیروی جانبی Lateral force		
	R ²	R ² a	R ² p	R ²	R ² a	R ² p	R ²	R ² a	R ² p
خطی Linear	0.90	0.89	0.67	0.94	0.93	0.89	0.89	0.87	0.78
دوفاکتوره 2FI	0.91	0.88	0.77	0.94	0.92	0.75	0.89	0.86	0.51
درجه دوم Quadratic	0.97	0.95	0.83	0.99	0.98	0.94	0.98	0.97	0.84

متغیرهای عمق خاک‌ورزی (X_1)، سرعت پیشروی (X_2)، اثر متقابل عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی (X_1X_2) و همچنین مجذور متغیرهای عمق خاک‌ورزی (X_1^2) و سرعت پیشروی (X_2^2) به دلیل معنی‌دار بودن در رابطه با نیروی عمودی (جدول ۶)، در این مدل گنجانده شدند. معیارهای عملکردی آماری R^2 ، MRDM و RMSE برای مدل نیروی عمودی به ترتیب ۰/۹۸۳، ۰/۳۱۹ kN و ۴/۲۴۵٪ به دست آمدند. مدلی که از روش سطح پاسخ برای پیش‌بینی نیروی جانبی وارد بر گاواهن برگرداندار به دست آمد، در رابطه (۱۶) نشان داده شده است.

برای مدل‌سازی نیروی کششی گاواهن برگرداندار از متغیرهای عمق خاک‌ورزی (X_1)، سرعت پیشروی (X_2) و مجذور متغیرهای عمق خاک‌ورزی (X_1^2) و سرعت پیشروی (X_2^2) به دلیل معنی‌دار بودن در رابطه با نیروی کششی (جدول ۶)، استفاده گردید. مدل به دست آمده با استفاده از روش سطح پاسخ برای پیش‌بینی نیروی کششی گاواهن برگرداندار در رابطه (۱۴) نشان داده شده است. معیارهای عملکردی آماری برای مدل نیروی کششی $R^2 = ۰/۹۸۷$ ، $MRDM = ۲/۳۵۲$ ٪ و $RMSE = ۰/۳۲۵$ kN (۱۵)، مدل به دست آمده از روش سطح پاسخ برای پیش‌بینی مقادیر نیروی عمودی وارد بر گاواهن برگرداندار می‌باشد. در این مدل

جدول ۶- تجزیه واریانس نیروی‌های وارد بر گاوآهن برگرداندار

Table 6- Analysis of variance (ANOVA) of forces on moldboard plough

متغیرهای مدل Model treatments	درجه آزادی Degree of freedom	مجموع مربعات Sum of square		
		نیروی کششی Draft force	نیروی عمودی Vertical force	نیروی جانبی Lateral force
مدل Model	5	51.63**	25.26**	11.03**
X ₁	1	43.85**	21.55**	8.50**
X ₂	1	4.32**	2.47**	1.53**
X ₁ X ₂	1	0.15 ^{ns}	0.81*	0.051*
X ₁ ²	1	1.37*	0.34*	0.63**
X ₂ ²	1	0.71*	0.42**	0.049 ^{ns}
عدم برازش Lack of fit	3	1.24 ^{ns}	0.14 ^{ns}	0.17 ^{ns}
مانده‌ها Residuals	7	1.41	0.20	0.19
خطا Error	12	53.03	25.46	11.21

** = P ≤ 0.01, * = P ≤ 0.05, ns = non-significant.

نیروی جانبی استفاده شد. معیارهای عملکردی آماری که برای مدل نیروی جانبی به دست آمد، R²=۰/۹۷۱، RMSE=۰/۱۳۵ kN و MRDM=۲/۶۸۹٪ بودند.

بر اساس جدول ۶، عمق خاک‌ورزی (X₁)، سرعت پیشروی (X₂)، اثر متقابل عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی (X₁X₂) و همچنین مجذور متغیر عمق خاک‌ورزی (X₁²) بر نیروی جانبی معنی‌دار شده‌اند. به همین دلیل از این متغیرهای معنی‌دار برای مدل‌سازی

$$\text{Draft force} = 3.71320 + 0.14357 X_1 - 0.31423 X_2 + 0.00992 X_1^2 + 0.25886 X_2^2 \quad (14)$$

$$\text{Vertical force} = 6.14160 - 0.27614 X_1 - 1.23100 X_2 + 0.047480 X_1 X_2 + 0.016789 X_1^2 + 0.29200 X_2^2 \quad (15)$$

$$\text{Lateral force} = 2.69840 - 0.057509 X_1 + 0.089000 X_2 + 0.018520 X_1 X_2 + 0.006515 X_1^2 \quad (16)$$

نیز در پژوهش‌های خود دقت نسبتاً بالای روش سطح پاسخ را تأیید کرده‌اند (Maran and Priya., 2015; Mostafaei et al., 2016).

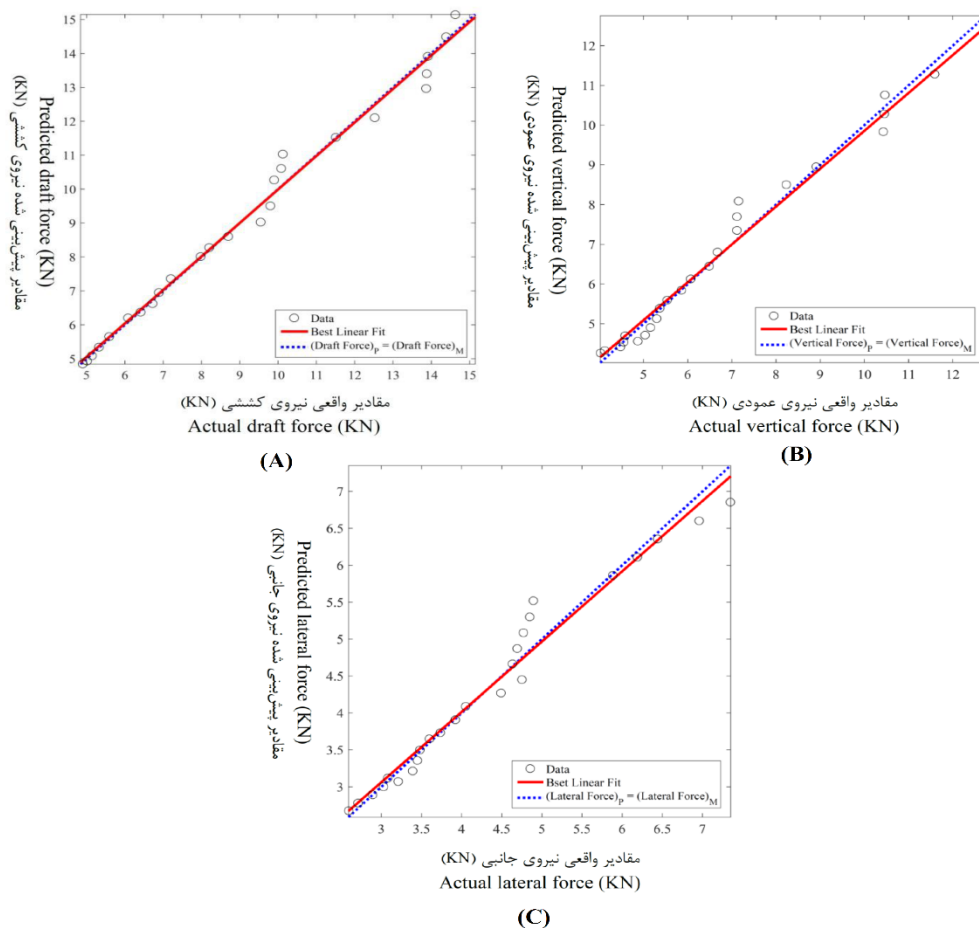
مدل‌های به دست آمده به روش شبکه عصبی مصنوعی

معیارهای عملکردی آماری R²، RMSE و MRDM برای مدل نیروی کششی که توسط شبکه عصبی مصنوعی به دست آمد به ترتیب ۰/۹۹۸، ۰/۱۸۹ kN و ۱/۷۵۲٪ بودند. همچنین این معیارها برای نیروی عمودی به ترتیب ۰/۹۹۶، ۰/۱۴۱ kN و ۳/۷۶۹٪ و برای نیروی جانبی به ترتیب ۰/۹۹۸، ۰/۱۲۲ kN و ۱/۹۵۶٪ بودند. همچنین با توجه به نمودارهای برازش نیروهای واقعی و پیش‌بینی شده که برای نیروهای کششی، عمودی و جانبی به دست آمد، می‌توان مطابقت و همبستگی مناسب را در بین داده‌ها مشاهده نمود (شکل‌های A-۷، B-۷، C-۷). با توجه به مقادیر مناسب معیارهای عملکردی آماری و همچنین مطابقت مناسب بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده،

شکل‌های (A-۶)، (B-۶) و (C-۶)، به ترتیب نشان‌دهنده مطابقت خوب بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده نیروهای کششی، عمودی و جانبی توسط مدل می‌باشد. براساس دلایلی همچون مطابقت مناسب بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده نیروی‌های کششی، عمودی و جانبی، مقادیر خوب معیارهای عملکردی آماری مربوط به این مدل‌ها و همچنین معنی‌دار نشدن عدم برازش مدل‌های مورد نظر (جدول ۶)، می‌توان گفت که رابطه‌های (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) به خوبی و با دقت نسبتاً بالا و مناسبی می‌توانند مقادیر نیروی‌های وارد بر گاوآهن برگرداندار را پیش‌بینی کنند. دلیل این دقت نسبتاً بالا را می‌توان استفاده از طرح Historical data بیان نمود، چرا که در این طرح از درصد بالایی از مقادیر داده‌ها برای مدل‌سازی استفاده می‌شود. با همین دلیل دقت مدل‌ها برای پیش‌بینی مقادیر مد نظر بالا می‌رود. همچنین برخی از پژوهشگران

آمد، با نتایج سایر پژوهشگران که بیان نمودند شبکه عصبی به خوبی قادر به پیش بینی مقادیر مورد نظر است، مطابقت دارد (Taghavifar and Mardani, 2014a; Taghavifar and Mardani, 2014b; Shafaei et al., 2018).

می توان گفت که شبکه عصبی مصنوعی به خوبی و با دقت بالایی توانست نیروهای کششی، عمودی و جانبی وارد بر گاوآهن برگرداندار را پیش بینی کند. دلیل این پیش بینی با دقت بالا، ماهیت شبکه عصبی است که می تواند به خوبی رابطه های غیر خطی را پیش بینی کند (Mostafaei et al., 2016). نتایجی که در این بخش به دست



شکل ۶- نمودار مقادیر واقعی و پیش بینی شده توسط روش سطح پاسخ: A- نیروی کششی، B- نیروی عمودی و C- نیروی جانبی
 Fig.6. Mapping between predicted and actual values by Response surface methodology: A- Draft force, B- Vertical force, C- Lateral force

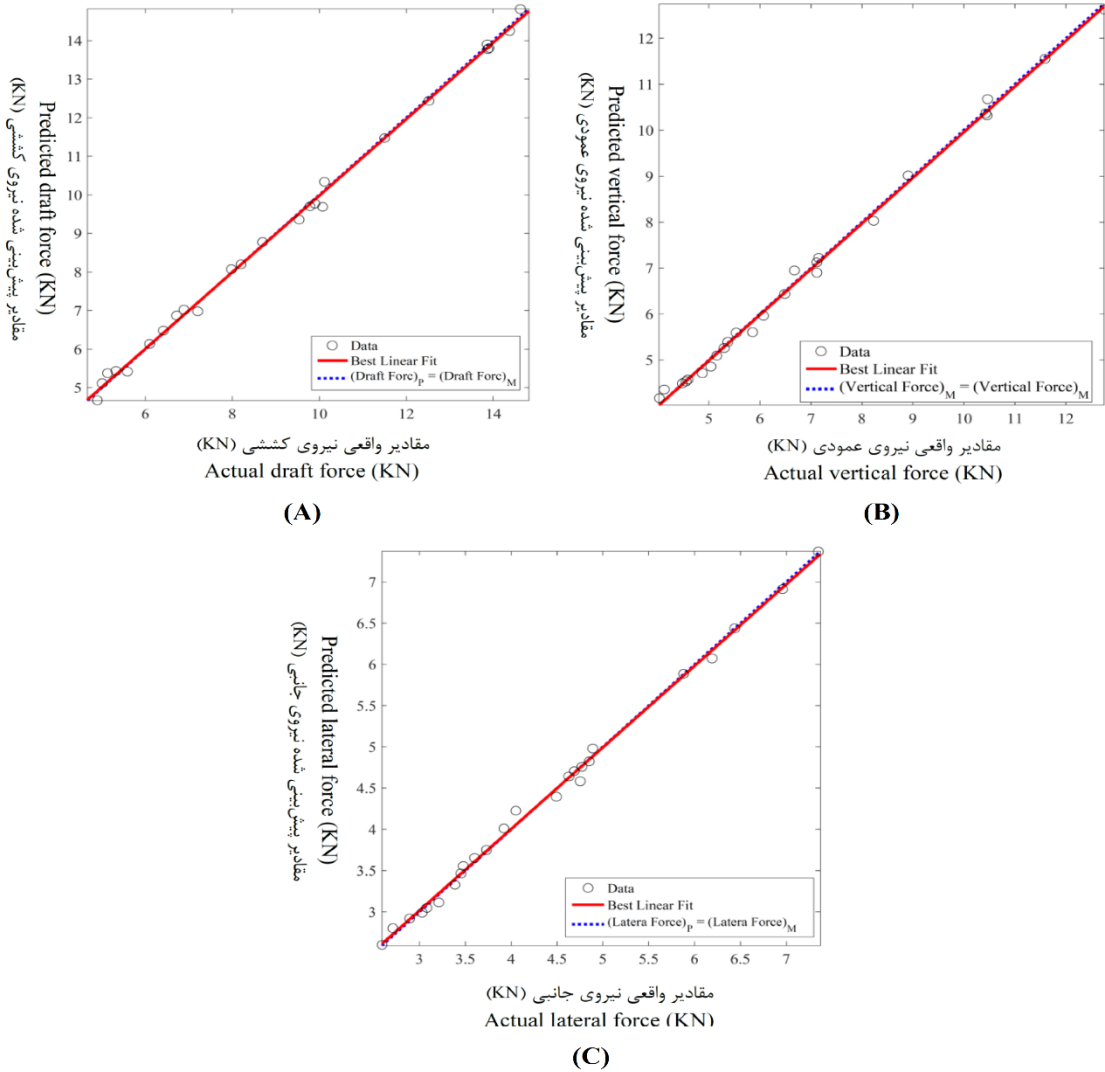
وارد بر گاوآهن برگرداندار به روش شبکه عصبی مصنوعی بالاتر از روش سطح پاسخ بود. همچنین دیگر معیارهای عملکردی آماری مانند RMSE و MRDM نیز برای روش شبکه عصبی مصنوعی کمتر از روش سطح پاسخ بود. با این تفاسیر می توان گفت که روش شبکه عصبی مصنوعی نسبت به روش سطح پاسخ در پیش بینی نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار از دقت نسبتاً بالاتری برخوردار می باشد (Mostafaei et al., 2016). یکی از دلایل بهتر بودن شبکه عصبی مصنوعی، قابلیت یادگیری آن (مبتنی بر هوش مصنوعی) برای تخمین رابطه ی بین ورودی ها و خروجی ها هنگامی که ذات مسأله

مقایسه مدل های به دست آمده به کمک روش های سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی

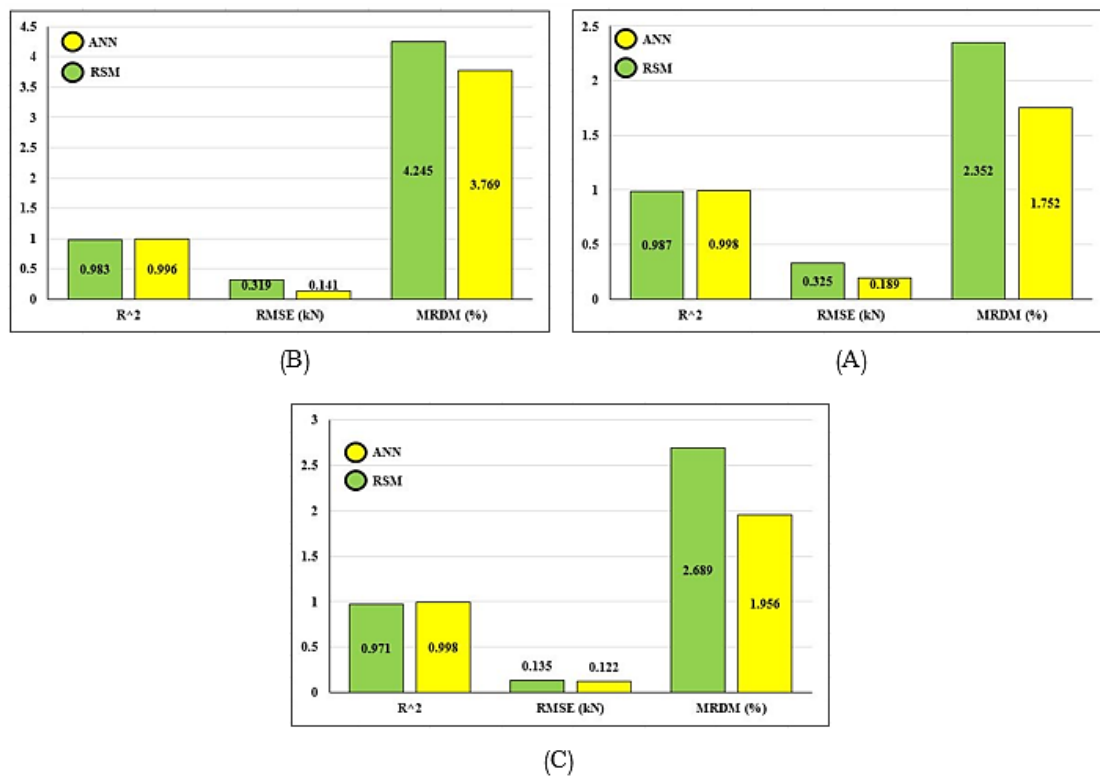
معیارهای عملکردی آماری به دست آمده برای روش های سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی برای نیروهای کششی، عمودی و جانبی در شکل ۸ نشان داده شده اند. مقادیر معیارهای عملکردی آماری به دست آمده، نشان دهنده ی توانایی دو روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی برای پیش بینی نیروهای مورد نظر می باشند. اما با مقایسه ی معیارهای عملکردی در بین دو روش مذکور، مشاهده می شود که ضریب تعیین مدل های به دست آمده برای تمام نیروهای

عصبی به خوبی قادر به پیش‌بینی مقادیر بوده و از دیگر روش‌ها عملکرد مناسب‌تری داشته است (Roul *et al.*, 2009; Taghavifar *et al.*, 2013; Taghavifar and Mardani, 2014a; Taghavifar and Mardani, 2014b; Shafaei *et al.*, 2018).

غیرخطی می‌باشد. در صورتی که روش سطح پاسخ محدود به چند جمله‌ای‌های مرتبه دوم است (Maran and Priya, 2015; Sarve *et al.*, 2015; Mostafaei *et al.*, 2016). دیگر پژوهشگران نیز که از شبکه عصبی مصنوعی در پژوهش‌های خود استفاده نموده و یا آن را با مدل‌های ریاضی دیگری مقایسه نموده‌اند، بیان کرده‌اند که شبکه



شکل ۷- نمودار مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی مصنوعی: A- نیروی کششی، B- نیروی عمودی و C- نیروی جانبی
Fig.7. Mapping between predicted and actual values by Artificial Neural Network: A- Draft force, B- Vertical force, C- Lateral force



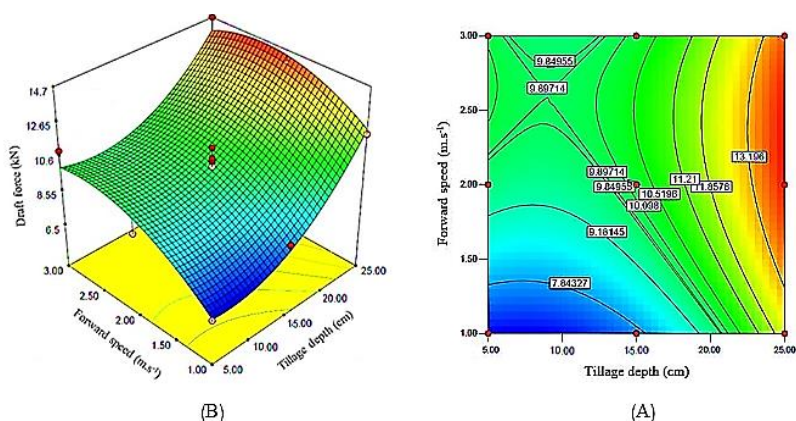
شکل ۸- پارامترهای عملکردی آماری به دست آمده برای مدل های شبکه عصبی مصنوعی و روش سطح پاسخ برای: A- نیروی کششی، B- نیروی عمودی، C- نیروی جانبی. (ANN: شبکه عصبی مصنوعی؛ RSM: روش سطح پاسخ)

Fig.8. Statistical performance criteria obtained for the ANN and RSM models for the: A- Draft force, B- Vertical force, C- Lateral force. (ANN: Artificial neural network; RSM: Response surface methodology)

بر نیرو را بررسی کرده بودند، مطابقت دارد (Sahu and Raheman, 2006; Al-Suhaibani and Ghaly, 2010; Ibrahmi *et al.*, 2015a; Ibrahmi *et al.*, 2015b; Ucgul *et al.*, 2017). همچنین با افزایش سرعت پیشروی، شتاب و سرعتی که از طرف گاواهن به خاک وارد می گردد، افزایش یافته و خاک را با شتاب و سرعت بیشتری جابه جا و برگردان می کند. ذرات خاک در برابر این شتاب و جابه جایی سریع، واکنش نشان داده و مقاومت می کنند، به همین دلیل گاواهن باید نیروی بیشتری برای غلبه بر مقاومت ذرات خاک اعمال کند که باعث افزایش نیروهای کششی، عمودی و جانبی می گردد. دیگر پژوهشگران نیز بیان کرده اند که با افزایش سرعت پیشروی، نیروهای وارد بر گاواهن افزایش می یابد که نتایج به دست آمده در این پژوهش با نتایج این پژوهشگران مطابقت دارد (Sahu and Raheman, 2006; Godwin *et al.*, 2007; Al-suhaibani and Ghaly, 2010; Akbarnia *et al.*, 2014; Ibrahmi *et al.*, 2015a; Ibrahmi *et al.*, 2015b; Ucgul *et al.*, 2017).

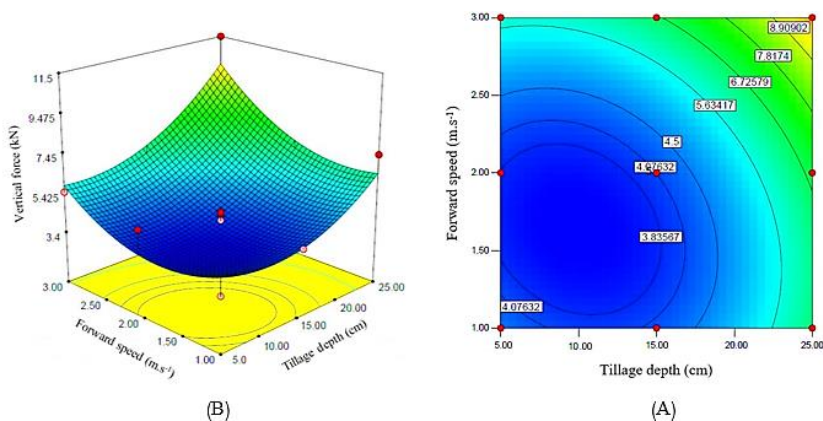
بررسی نیروهای وارد بر گاواهن برگرداندار

اثر متقابل عمق خاکورزی و سرعت پیشروی بر نیروهای کششی، عمودی و جانبی گاواهن برگرداندار به ترتیب در شکل های (۹)، (۱۰) و (۱۱)، نشان داده شده است. بر اساس این شکل ها، با افزایش عمق خاکورزی، افزایش سرعت پیشروی و یا افزایش همزمان عمق خاکورزی و سرعت پیشروی، به صورت غیر خطی نیروهای مورد نظر وارد بر گاواهن برگرداندار نیز افزایش یافته اند. به همین منظور، با افزایش عمق خاکورزی از ۵ تا ۲۵ سانتی متر و سرعت پیشروی از ۱ تا ۳ متر بر ثانیه، مقادیر نیروهای کششی، عمودی و جانبی از کمترین مقدار تا بیشترین مقدار به ترتیب ۶۶/۵۵٪، ۶۸/۴۷٪ و ۶۴/۷۶٪ افزایش داشته اند. با افزایش عمق خاکورزی، حجم خاکی که باید توسط گاواهن برش داده و برگردان شود، افزایش می یابد. به همین دلیل مقاومت خاک در برابر حرکت گاواهن بیشتر شده که باعث افزایش نیروی کششی، عمودی و جانبی گاواهن برگرداندار می گردد. این نتایج با نتایج سایر پژوهشگران که اثر عمق



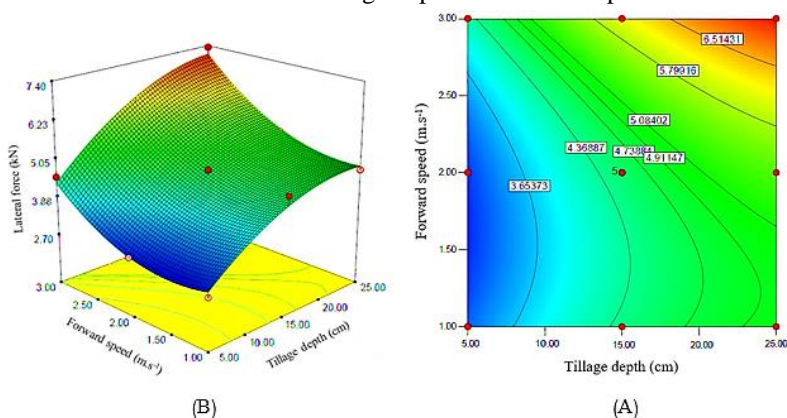
شکل ۹- (A) کانتور اثر متقابل عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی بر نیروی کششی، (B) اثر متقابل عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی بر نیروی کششی

Fig.9. (A) Contour plat of the effect of interaction between the tillage depth and forward speed on draft force, (B) The effect of interaction between the tillage depth and forward speed on draft force



شکل ۱۰- (A) کانتور اثر متقابل عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی بر نیروی عمودی، (B) اثر متقابل عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی بر نیروی عمودی

Fig.10. (A) Contour plat of the effect of interaction between the tillage depth and forward speed on vertical force, (B) The effect of interaction between the tillage depth and forward speed on vertical force



شکل ۱۱- (A) کانتور اثر متقابل عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی بر نیروی جانبی، (B) اثر متقابل عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی بر نیروی جانبی

Fig.11. (A) Contour plat of the effect of interaction between the tillage depth and forward speed on lateral force, (B) The effect of interaction between the tillage depth and forward speed on lateral force

توجه به تمام نتایجی که از پژوهش حاضر به دست آمد، می‌توان گفت که مدل‌های توسعه‌یافته به کمک روش شبکه عصبی مصنوعی در این پژوهش یک ابزار خوب و قدرتمند برای پیش‌بینی نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار چه در عملیات مزرعه‌ای و چه در پژوهش‌های مرتبط به عملیات خاک‌ورزی با گاوآهن برگرداندار، می‌باشند. همچنین توصیه می‌گردد که از مدل‌های توسعه‌یافته در این پژوهش برای مدیریت عملیات خاک‌ورزی مانند انتخاب تراکتور مناسب، استفاده شود. با این حال نیز توصیه می‌گردد که سایر عوامل تأثیرگذار بر نیروها مانند زاویه‌های گاوآهن برگرداندار در مدل‌های آینده گنجانده شود تا توانایی مدل برای پیش‌بینی نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار افزایش یابد.

نتیجه‌گیری

با توجه به شاخص‌های آماری نظیر R^2 ، RMSE و MRDM که برای هر یک از مدل‌های به دست آمده توسط روش سطح پاسخ و روش شبکه عصبی مصنوعی به دست آمد، نتیجه نشان می‌دهد که این دو روش می‌توانند به خوبی نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار را پیش‌بینی کنند. اما با مقایسه شاخص‌های آماری در بین این دو روش، نتیجه نشان می‌دهد که روش شبکه عصبی مصنوعی نسبت به روش دیگر عملکرد مناسب‌تری برای پیش‌بینی نیروهای وارد بر گاوآهن برگرداندار دارد. نتایج داده‌های به دست آمده حاکی از آن است که با افزایش عمق خاک‌ورزی از ۵ تا ۲۵ سانتی‌متر و سرعت پیشروی از ۱ تا ۳ متر بر ثانیه، منجر به افزایش غیر خطی نیروهای کششی، عمودی و جانبی به ترتیب $۶۶/۵۵\%$ ، $۶۸/۴۷\%$ و $۶۴/۷۶\%$ می‌شود. با

References

1. ABAQUS. 2016. ABAQUS User's Manuals Version 6.12.1. ABAQUS Inc. Providence, RI.
2. Abo-Elnor, M., R. Hamilton, and J. Boyle. 2004. Simulation of soil-blade interaction for sandy soil using advanced 3D finite element analysis. *Soil and Tillage Research* 75 (1): 61-73.
3. AISI Standard. 2011. S905-08: Test methods for mechanically fastened cold-formed steel connections.
4. Akbarnia, A., A. Mohammadi, R. Alimardani, and F. Farhani. 2014. Simulation of draft force of winged share tillage tool using artificial neural network model. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 16 (4): 57-65.
5. Al-Suhaibani, S., and A. E. Ghaly. 2010. Effect of plowing depth of tillage and forward speed on the performance of a medium size chisel plow operating in a sandy soil. *American Journal of Agricultural and Biological Science*.
6. Arvidsson, J., T. Keller, and K. Gustafson. 2004. Specific draught for moldboard plough, chisel plough and disc harrow at different water contents. *Soil and Tillage Research* 79: 221-231.
7. Bentaher, H., A. Ibrahmi, E. Hamza, M. Hbaieb, G. Kantchev, A. Maalej, and W. Arnold. 2013. Finite element simulation of moldboard-soil interaction. *Soil and Tillage Research* 134: 11-16.
8. Bishop, C. 2006. *Pattern recognition and machine learning*. USA: Springer.
9. Chen, Y., L. J. Munkholm, and T. Nyord. 2013. A discrete element model for soil-sweep interaction in three different soils. *Soil and Tillage Research* 126: 34-41.
10. Durairaj, C., and M. Balasubramanian. 1997. A method for dynamic measurement of soil failure patterns caused by tillage tools. *Soil and Tillage Research* 41: 115-121.
11. Godwin, R. J., M. J. O'Dogherty, C. Saunders, and A. T. Balafoutis. 2007. A force prediction model for mouldboard ploughs incorporating the effects of soil characteristic properties, plough geometric factors and ploughing speed. *Biosystems Engineering* 97 (1): 117-129.
12. Hosseini, M., S. A. Movahedi Naeini, A. A. Dehghani, and Y. Khaledian. 2016. Estimation of soil mechanical resistance parameter by using particle swarm optimization, genetic algorithm and multiple regression methods. *Soil and Tillage Research* 157: 32-42.
13. Ibrahmi, A., H. Bentaher, M. Hbaieb, A. Maalej, and A. Mouazen. 2015a. Study the effect of tool geometry and operational conditions on mouldboard plough forces and energy requirement: Part 1. Finite element simulation. *Computers and Electronics in Agriculture* 117: 258-267.
14. Ibrahmi, A., H. Bentaher, E. Hamza, A. Maalej, and A. Mouazen. 2015b. Study the effect of tool geometry and operational conditions on mouldboard plough forces and energy requirement: Part 2. Experimental validation with soil bin test. *Computers and Electronics in Agriculture* 117: 268-275.
15. Jafari, R., and T. TavakoliHashjin. 2016. Performance evaluation of modified Bentleg plow using finite element approach. *Iran Agricultural Research* 35 (1): 63-72.
16. Li, B., Y. Chen, and J. Chen. 2016. Modeling of soil-claw interaction using the discrete element method (DEM). *Soil and Tillage Research* 158: 177-185.
17. Maran, J. P., and B. Priya. 2015. Comparison of response surface methodology and artificial neural network approach towards efficient ultrasound-assisted biodiesel production from muskmelon oil. *Ultrason Sonochem* 23: 192-200.
18. Mckyes, E. 1985. *Soil Cutting and Tillage*. Elsevier Science Publishing Company Inc., 52 Vanderbilt Avenue, New York, NY 10017, USA.

19. Miron, R., D. Hrimiuc, H. Shimada, and S. V. Sabau. 2002. The geometry of Hamilton and Lagrange spaces. Kluwer academic publishers.
20. Mostafaei, M., H. Javadikia, and L. Naderloo. 2016. Modeling the effects of ultrasound power and reactor dimension on the biodiesel production yield: Comparison of prediction abilities between response surface methodology (RSM) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *Energy* 115: 626-636.
21. Rahmatian, M., S. H. Karparvarfard, and M. A. Nematollahi. 2018. Prediction for optimizing performance of chisel blade used in combined tillage to obtain suitable effectiveness. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 49 (1): 73-82. (In Farsi).
22. Roul, A. K., H. Raheman, M. S. Pansare, and R. Machavaram. 2009. Predicting the draught requirement of tillage implements in sandy clay loam soil using an artificial neural network. *Biosystems Engineering* 104: 476-485.
23. Salar, M. R., and S. H. Karparvarfard. 2017. Modeling and optimization of wing geometry effect on draft and vertical forces of winged chisel plow. *Journal of Agricultural Machinery* 7 (2): 468-479. (In Farsi).
24. Sahu, R. K., and H. Raheman. 2006. Draught prediction of agricultural implements using reference tillage tools in sandy clay loam soil. *Biosystems Engineering* 94 (2): 275-284.
25. Sarve, A., S. S. Sonawane, and M. N. Varma. 2015. Ultrasound assisted biodiesel production from sesame (*Sesamum indicum* L.) oil using barium hydroxide as a heterogeneous catalyst: comparative assessment of prediction abilities between response surface methodology (RSM) and artificial neural network (ANN). *Ultrason Sonochem* 26: 218-28.
26. Shafaei, S. M., M. Loghavi, and S. A. Kamgar. 2018. Comparative study between mathematical models and the ANN data mining technique in draft force prediction of disk plow implement in clay loam soil. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. (In press).
27. Shafaei, S. M., and S. Kamgar, 2017. Comprehensive investigation on static and dynamic friction coefficients of wheat grain with the adoption of statistical analysis. *Journal of Advanced Research* 8 (1): 51-61.
28. Shmulevich, I., Z. Asaf, and D. Rubinstein. 2007. Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method. *Soil and Tillage Research* 97 (1): 37-50.
29. Srivastava, A. K., C. E. Goering, R. P. Rohrbach, and D. R. Buckmaster. 2006. Soil tillage. Chapter 8 in *Engineering Principles of Agricultural Machines*, 2nd ed., 169-230. St. Joseph, Michigan: ASABE.
30. Taghavifar, H., A. Mardani, H. Karim-Maslak, and H. Kalbkhani. 2013. Artificial Neural Network estimation of wheel rolling resistance in clay loam soil. *Applied Soft Computing* 13 (8): 35-51.
31. Taghavifar, H., and A. Mardani. 2014a. Application of artificial neural networks for the prediction of traction performance parameters. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Science* 13 (1): 35-43.
32. Taghavifar, H., and A. Mardani. 2014b. Wavelet neural network applied for prognostication of contact pressure between soil and driving wheel. *Information Processing in Agriculture* 1 (1): 51-60.
33. Ucgul, M., C. Saunders, and J. M. Fielke. 2017. Discrete element modeling of tillage forces and soil movement of a one-third scale moldboard plough. *Biosystems Engineering* 155: 44-54.

Modeling and Predicting the Forces on Moldboard Plough by using Response Surface and Artificial Neural Network

M. Rahmatian¹, R. Yeganeh^{2*}, M. A. Nematollahi³

Received: 01-10-2018

Accepted: 21-01-2019

Introduction: Tillage is a very important operation that influences the growth and productivity of agricultural products. It is necessary to introduce some conditions to improve soil physical properties, aeration, permeability and root development in tillage operations. However, in primary tillage, especially when moldboard ploughs are used, this may be time consuming and costly for researchers to use it in their research. Some researchers use physical experiments to perform the work, which the accuracy of the results is dependent on the measuring instruments precision. However, some other researchers use simulation and mathematical modeling to reduce the time and costs and increase the relative accuracy of the research results. Many studies have also shown that modeling the forces involved in tillage is a good way to estimate the performance of different tillage tools and improve their geometry. However, the key to success in numerical simulation of tillage operations is to simulate the exact instrumentation, based on the correct assumptions as well as the proper methods. The prediction of the forces involved in tillage tools has an important role in their design. Collecting data on the forces involved in tillage tool under different farm conditions is a time consuming and costly task. Therefore, the prediction of a tillage tool forces is very important for the designer and the user in order to achieve better performance of the tool.

Materials and Methods: In this study, a cylindrical moldboard made by Alpler Company in Turkey was used to simulate the moldboard. A measuring device was designed and constructed to measure the various points of the desired moldboard. Then, the spatial points obtained by the measuring device were presented to the SolidWorks 2016 software and the desired moldboard was modeled. The finite element method by Abacus 2016 was then used to simulate the interaction between soil and moldboard. Treatments used in simulated tillage operations included tillage depths (5, 10, 15, 20 and 25 cm) and forward speed (1, 1.5, 2, 2.5 and 3 millimeters per second). The independent variables were considered as tensile, vertical and lateral forces (Kilo newton). After simulating the tillage operations, tensile, vertical and lateral forces were obtained. These forces were modeled using response surface and artificial neural networks techniques. Then, the obtained models were compared using R^2 , RMSE and MRDM statistical indices and the best model was selected.

Results and Discussion: When using the response surface method, the quadratic model was selected by using the maximum value of the statistical indices R^2 , R^2_a and R^2_p , among the linear, two-factor and quadratic models. Then, the significance of model variables was evaluated by using variance analysis. The forces were also modeled by using the neural network method. According to the fitting curves and statistical indices of R^2 , RMSE and MRDM for the tensile, vertical and lateral forces, it is revealed that both methods could well predict the forces but artificial neural network was more suitable than the response surface method. Moreover, by investigating the interactions of tillage treatments and forward speed on the forces in this research, it was observed that by increasing the depth of tillage and velocity, tensile, vertical and lateral forces were increased nonlinearly by 66.55%, 68.47%, and 64.76%, respectively.

Conclusions: Regarding all the results obtained from this study, it can be concluded that the developed models using the artificial neural network in this research was a good and powerful tool for predicting the forces involved in moldboard ploughs both in the field operations and in related studies. It is also recommended that the developed models in this study can be used to manage the tillage operations, such as selecting the proper tractor. However, it is also suggested that other affecting factors, such as moldboard angles, should be included in future models to increase the ability of the model to predict the forces involved in moldboard plows.

Keywords: Artificial neural network, Modeling, Moldboard plough, Response surface, Simulation

1- PhD student, Department of Biosystems Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

3- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

(*- Corresponding Author Email: r.yeganeh@ilam.ac.ir)