

پیش‌بینی فشار تماسی و مقاومت به نفوذ خاک با اندازه‌گیری مساحت تماسی لاستیک و هدایت الکتریکی ظاهری خاک

پیام فرهادی^۱، عبدالله گل محمدی^۲، احمد شریفی مالواجردی^{۳*} و غلامحسین شاهقلی^۴

۱، ۲ و ۴- به ترتیب دانشجوی دکتری مکانیک ماشین‌های کشاورزی؛ و اعضای هیأت علمی گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
۳- دانشیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۵/۴

چکیده

امروزه یکی از مسائل اصلی در مطالعه ماشین‌های کشاورزی، رابطه لاستیک و خاک و تأثیرات ناشی از آن است. در این مقاله، از یک سامانه آزمونگر تک چرخ برای اجرای آزمایش‌ها در شرایط کنترل شده انباره خاک استفاده شد. آزمون‌های مورد نظر با استفاده از یک لاستیک ۲۸-۱۲/۴ و در سه سطح بار عمودی (۶، ۹ و ۱۲ کیلو نیوتن)، سه سطح فشار باد (۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ کیلو پاسکال) و سه سطح رطوبتی (۱۱/۲۰، ۱۴/۸۶، ۱۸/۶۸ درصد) برای بررسی متغیرهای مورد نظر روی پارامترهای مساحت تماسی، فشار تماسی، فشردگی و هدایت الکتریکی ظاهری خاک اجرا شد. فشار تماسی متوسط با پارامترهای بار عمودی، فشار باد و رطوبت دارای رابطه مستقیم است. مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی فشار تماسی با ضریب تبیین مناسب به دست آمد ($R^2=0/946$). هدایت الکتریکی ظاهری با ضریب تبیین مناسبی نسبت به سه متغیر بار عمودی، فشار باد لاستیک و رطوبت خاک پیش‌بینی شد ($R^2=0/850$). ضریب تبیین مدل‌های ارائه شده برای پیش‌بینی مقاومت به نفوذ خاک (شاخص مخروط) با استفاده از هدایت الکتریکی ظاهری، با افزایش رطوبت کاهش پیدا کرد. عامل کنترل‌کننده تغییرات هدایت الکتریکی ظاهری خاک در سطوح رطوبتی پایین و در سطوح رطوبتی بالاتر به ترتیب بار عمودی و فشار باد لاستیک شناخته شد. همچنین با افزایش رطوبت، درصد خطای استفاده از پارامتر تغییرات هدایت الکتریکی ظاهری برای تخمین مقاومت به نفوذ بیشتر می‌شود.

واژه‌های کلیدی

آزمونگر تایر، انباره خاک، بار عمودی، شاخص مخروط خاک، فشار باد لاستیک

مقدمه

فشردگی و برش خاک و کاهش اکسیژن، آب، مواد مغذی و حرارت خاک را به همراه دارد و از این‌رو به کاهش عملکرد محصول می‌انجامد (Diserens *et al.*, 2011). حفظ نسبت‌های مناسب بین فازهای جامد، مایع و گاز خاک اهمیت ویژه‌ای دارد. این نسبت‌ها

در دهه‌های اخیر خطری اصلی که زمین‌های کشاورزی را تهدید می‌کند، کاهش مواد ارگانیک و فشردگی خاک در مزارع مکانیزه است. تردد در مزرعه و خاک‌ورزی با ماشین‌های سنگین کشاورزی،

این پارامتر در محاسبه فشار تماسی، مدل‌سازی توزیع تنش- کرنش در خاک و پیش‌بینی میزان فشردگی خود را نشان می‌دهد (Diserens, 2009).

در سال‌های اخیر، تحقیقاتی متنوع در زمینه رابطه لاستیک با خاک و بررسی تأثیرات این رابطه انجام گرفته است. از جمله مواردی که در این تحقیقات بررسی شده است تأثیر پارامترهای مختلف لاستیک و خاک بر مساحت تماسی و شکل سطح تماس لاستیک با خاک و لاستیک با سطح سخت است. الگوریتم‌های متنوعی برای محاسبه سطح تماس لاستیک در مزرعه ارائه شده‌اند (Steiner, 1979; Grečenko, 1995; Hallonborg, 1996) در بیشتر آنها از مدل بیضی کامل با نیمه‌محور a و b و توان متغیر مثبت برای تخمین شکل بیضی‌مانند رد اثر استفاده شده است. دی‌زرنس (Diserens, 2009) تغییر سطح تماس لاستیک با خاک ناشی از تغییر بار و فشار باد لاستیک را اندازه گرفت. او سطح تماس لاستیک را با پاشیدن آهک در اطراف لاستیک در حالت استاتیکی مشخص و با استفاده از عکس‌برداری ناحیه مشخص شده و استفاده از نرم‌افزار Adobe Photoshop Elements Software تجزیه و تحلیل کرد. برای اندازه‌گیری‌ها، از تخمین رگرسیون سطح تماس استفاده گردید. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که ابعاد، بار و فشار باد لاستیک متغیرهای معنی‌دار روی ارزیابی سطح تماس لاستیک هستند. همچنین مشاهدات نشان داده است که با سطوح پایین بار و افزایش فشار باد می‌توان سطح تماس را کاهش داد. دی‌زرنس و همکاران (Diserens et al., 2011) در تحقیقی مشابه برای لاستیک‌های با اندازه کوچک، متوسط و بزرگ سطح تماس لاستیک را با روش نورسنجی و استفاده از پودر اکسید کلسیم در اطراف سطح تماس

فقط در بعضی خاک‌ها و در شرایط اقلیمی خاص و فعالیت صحیح انسانی حاصل می‌شود. با ورود ماشین به مزرعه، حجم منافذ موجود در خاک کاهش پیدا می‌کند. از جمله شاخص‌های نشان‌دهنده تخریب ساختمان فیزیکی خاک، تراکم خاک است. تراکم خاک با افزایش در چگالی ظاهری خاک (جرم فاز جامد به حجم کل)، یا کاهش تخلخل تعریف می‌شود (Zareian, 1985). فشردگی حاصل از تردد ماشین‌های کشاورزی، عامل محدودکننده رشد و توسعه گیاه می‌تواند به‌طور میانگین موجب کاهش عملکرد محصول از یک تا ۳۷ درصد شود (Gill, 1990). علاوه بر کاهش عملکرد محصول، از دیدگاه مهندسان ماشین‌های کشاورزی، تراکم بیش از حد خاک باعث افزایش مقاومت مکانیکی خاک می‌شود و به‌تبع آن نیروی کششی، مصرف سوخت، زمان اجرای کار و ساییدگی ادوات کشاورزی افزایش خواهد یافت. تحقیقات نشان می‌دهد که در حدود ۶۰ درصد انرژی مکانیکی در کشاورزی مکانیزه در عملیات خاک‌ورزی و تهیه بستر بذر مصرف می‌شود (Jacobs & Finney, 1993).

اصلی‌ترین عامل ایجاد فشردگی در خاک‌های کشاورزی تماس لاستیک با خاک و وارد کردن فشار از طریق لاستیک به خاک است. سطح تماس لاستیک با خاک پارامتری کلیدی در ارزیابی تأثیر فیزیکی این تماس از جمله فشار تماسی و ایجاد فشردگی است. سطح تماس لاستیک با خاک و جابجایی خاک از پارامترهایی هستند که رابطه‌ای بسیار نزدیک با بار روی لاستیک، فشار باد لاستیک، نوع لاستیک و پارامترهای مرتبط با خاک مانند رطوبت و ساختمان فیزیکی آن دارد (Hallonborg, 1996). تخمین سطح تماس لاستیک برای تعیین شدت فشار وارد شده بر خاک اهمیت زیادی دارد.

که فشار تماسی با دو متغیر بار عمودی و فشار باد لاستیک رابطه مستقیم دارد. برتری استفاده از روش کلاسیک به همراه مساحت تماسی به دست آمده از پردازش تصویر، نسبت به اندازه گیری مستقیم فشار تماسی با استفاده از مبدل نیرو، از نتایج تحقیقات این محققان است.

علاوه بر مطالعه شکل رد اثر لاستیک می توان به تأثیر لاستیک بر فشردگی در لایه های مختلف خاک اشاره کرد. برای اندازه گیری این فشردگی، از نفوذسنج های عمودی و افقی استفاده می شود. شریفی و همکاران (Sharifi et al., 2007) از ابزاری مخصوص برای اندازه گیری پروفیل فشردگی خاک در انبار خاک و در مزرعه استفاده کردند. این ابزار شامل هشت لبه گوه ای شکل مجهز به کرنش سنج، روی پیشانی یک شاخه زیرشکن با عمق کار ۴۵ سانتی متر برای اندازه گیری نیمرخ فشردگی خاک است. با استفاده از این ابزار، شریفی و همکاران (Sharifi-Malvajardi et al., 2011) تأثیر فشار باد لاستیک نرم بر مقاومت به نفوذ عمودی و شاخص مقاومت افقی خاک در لایه های مختلف را اندازه گیری کردند. نتایج به دست آمده نشان داده است که اختلاف بین مقاومت به نفوذ عمودی و نیروی افقی در لایه های پایین خاک معنی دار است و هیچ اختلاف معنی داری در میانگین مقادیر این صفات در عمق سطحی وجود ندارد. در آزمایشی مشابه، شریفی مالواجردی و همکاران (Sharifi-Malvajardi et al., 2013) تأثیر بار عمودی و فشار باد لاستیک سخت را بر برخی عوامل مرتبط با فشردگی خاک، شامل عمق و عرض رد اثر لاستیک، مقاومت به نفوذ عمودی و شاخص مقاومت افقی خاک در لایه های مختلف خاک بررسی کردند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داده است

استاتیکی لاستیک با خاک و سپس عکس برداری از ناحیه تماس و آنالیز عکس گرفته شده، اندازه گیری کردند. این محققان با آنالیز رگرسیون نشان دادند که تخمین سطح تماس نه تنها با متغیرهای اندازه لاستیک، بار و فشار باد بلکه با ویژگی هایی از لاستیک مانند سطح تماس ویژه و استحکام لاستیک نیز ارتباط دارد که برای دامنه های گسترده از لاستیک ها یکسان نیستند.

تعدادی از تحقیقات برای ارتباط دادن مساحت تماسی با مقاومت غلتشی لاستیک و نیز مصرف سوخت ادوات کشاورزی در مزرعه بوده است. برای این منظور تقوی فر و مردانی (Taghavifar & Mardani, 2013a) تأثیر سرعت، فشار باد و بار عمودی روی مقاومت غلتشی لاستیک را در خاک لوم رسی در انبار خاک بررسی و مساحت رد اثر لاستیک را با پاشیدن پودر سفید در اطراف لاستیک و عکس برداری از رد اثر و نیز آنالیز عکس گرفته شده با نرم افزار MATLAB اندازه گیری کردند. نتایج این بررسی ها نشان داده است که مقاومت غلتشی کمترین تأثیر را از سرعت حرکت دارد و بیشترین تأثیر را از باد لاستیک و بار عمودی روی لاستیک می گیرد؛ افزایش در بار عمودی نیز موجب افزایش مقاومت غلتشی می شود. تقوی فر و مردانی (Taghavifar & Mardani, 2013b) پارامتر مساحت تماسی و همچنین فشار تماسی لاستیک با خاک را اندازه گیری کردند و مساحت تماسی را با استفاده از روش پردازش تصویر و فشار تماسی لاستیک با خاک با هفت مبدل نیروی قرار داده شده در انبار خاک و در زیر لاستیک به دست آوردند. آنها فشار تماسی متوسط را با روش کلاسیک و استفاده از بار عمودی روی لاستیک و مساحت تماسی حاصل از تکنیک پردازش تصویر اندازه گیری کردند و نتیجه گرفتند

لاستیک و رطوبت خاک بر متغیرهای مساحت تماسی، فشردگی و تغییرات هدایت الکتریکی ظاهری.

۲- بررسی ارتباط پارامترهای مساحت تماسی، فشردگی و تغییرات هدایت الکتریکی ظاهری با یکدیگر و با پارامتر فشار تماسی، در شرایط کنترل شده در انبار خاک با استفاده از سامانه آزمونگر تک‌چرخ.

۳- بررسی قابلیت پارامتر هدایت الکتریکی ظاهری برای پیش‌بینی فشردگی به منظور تهیه نقشه فشردگی خاک.

مواد و روش‌ها

برای اجرای آزمایش‌های طراحی شده در این مقاله، از انبار خاک موجود در موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی (AERI) استفاده شد. انبار خاک مورد نظر با ۲۰ متر طول، ۱/۷ متر پهنا و ۱/۳ متر عمق از خاکی با بافت لوم رسی پر شده است. ترکیب ساختاری خاک و بعضی از ویژگی‌های مکانیکی آن در ارائه شده است.

که فشردگی خاک ناشی از میزان بار عمودی وارد بر لاستیک در لایه‌های زیرین، نسبت به لایه‌های سطحی خاک، بیشتر است؛ در حالی که اثر فشار باد لاستیک بر فشردگی در عمق‌های سطحی (در دو سطح بار استفاده شده) بزرگ‌تر از اثر آن در عمق‌های زیرین خاک است. این محققان نتیجه گرفتند که با افزایش میزان بار، مقادیر عرض و عمق رد اثر لاستیک و مقاومت به نفوذ افزایش پیدا می‌کند و با افزایش فشار باد، عرض رد اثر لاستیک کاهش و عمق رد اثر لاستیک و مقاومت به نفوذ خاک افزایش می‌یابد.

مقاومت الکتریکی خاک تحت تأثیر حضور آب در منافذ و ساختار فیزیکی آن قرار دارد، زیرا هندسه منافذ بر فاز آبی موجود در خاک و مسیر جریان الکترون‌ها اثر می‌گذارد (Gingine et al., 2016). از این رو می‌توان هدایت الکتریکی ظاهری خاک را تابعی از فشردگی آن فرض کرد. بنابراین با توجه به بررسی منابع موجود، لزوم تحقیق با اهداف زیر مورد نظر خواهد بود:

۱- بررسی تأثیر پارامترهای بار عمودی، فشار باد

جدول ۱- ترکیب ساختاری و خصوصیات مکانیکی خاک مورد آزمون

خصوصیت	gg ⁻¹	
ترکیب ساختاری	رس	۰/۲۹۰
	سیلت	۰/۳۳۰
	شن	۰/۳۸۰
	ماده آلی	۰/۰۱۷
ویژگی‌های مکانیکی	حد پلاستیک (PL)	۰/۲۴۲
	حد روانی (LL)	۰/۳۲۲
	حد انقباض (SL)	۰/۱۰۸

کیلووات استفاده شد. به منظور کاهش سرعت دورانی الکتروموتور و افزایش گشتاور تحویلی به لاستیک، یک گیربکس با نسبت کاهشی ۱:۱۰۴ به کار گرفته شد.

برای آزمون لاستیک در انبار خاک، از یک آزمونگر تک چرخ با ابعاد ۳/۱۰ متر طول، ۱/۹۰ متر پهنا و ۲/۲۳ متر ارتفاع و برای تأمین توان حرکتی لاستیک از یک الکتروموتور سه فاز با توان ۱۱



شکل ۱- سامانه آزمونگر موجود در AERI (چپ)؛ نمای شماتیکی سامانه همراه با اجزای آن (راست)

اجرا شد. آزمایش‌ها به صورت آزمون فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی (CRD) با سه تکرار برای هر آزمون دنبال شد. برای تحلیل آماری داده‌های حاصل از آزمون‌ها، نرم‌افزار آماری SPSS 23 به کار گرفته شد.

میانگین داده‌های جمع‌آوری شده با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن با سطح معنی‌داری ۵ درصد ارزیابی شد. برای آزمون در انباره خاک، ابتدا خاک موجود در انباره با استفاده از سامانه آماده‌ساز خاک آماده شد و برای هر آزمون خاک تا عمق ۵۰ سانتی‌متری آماده گردید. جدول ۲ خلاصه‌ای از آزمون‌های گفته شده این مقاله را نشان می‌دهد.

برای محاسبه مساحت تماسی لاستیک با خاک، پس از قرار دادن لاستیک تحت اثر بار عمودی و فشار باد مورد نظر روی خاک، به منظور ایجاد تفاوت در محل تماس لاستیک با خاک به اطراف محل تماس لاستیک با خاک گچ پاشیده شد. با بلند کردن لاستیک از روی خاک، محل تماس لاستیک نسبت به خاک دست نخورده را گچ متمایز کرد. در ارتفاعی مشخص و با استفاده از دوربین عکاسی (Canon, PowerShot S2 IS)، از رد اثر لاستیک با خاک عکس‌برداری شد (نمونه‌ای از رد اثر متمایز شده با گچ در شکل ۲ ارائه شده است). در کنار هر

به منظور تولید سرعت‌های مختلف و رسیدن به سرعت پیشروی مورد نظر از یک اینورتر (AC motor speed controller; LS600-2020) استفاده گردید. برای اندازه‌گیری سرعت دورانی، گشتاور و توان تحویلی به چرخ، یک مبدل گشتاور (Datum Electronics, PTO shaft torque and powersystem; Series 420 PTO system) با ظرفیت ۱۸۰۰ نیوتن‌متر به صورت واسط بین الکتروموتور و گیربکس قرار داده شد. از یک سیستم هیدرولیک با فشار خروجی ۱/۵ مگاپاسکال برای تأمین بار عمودی روی لاستیک و برای تأمین توان سیستم هیدرولیک از یک الکتروموتور با توان ۲/۲ کیلووات و یک گیربکس با نسبت کاهشی ۲:۳ استفاده شد. از یک مبدل نیرو (Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.; CLP-30KNB) با ظرفیت ۳۰ کیلونیوتن برای اندازه‌گیری بار عمودی وارده بر لاستیک در زیر سیلندر هیدرولیک و از یک چرخ مازاد متصل به یک شمارنده دیجیتال (RS Components Ltd.; RS-58) برای اندازه‌گیری سرعت واقعی سامانه آزمونگر استفاده گردید (شکل ۱). آزمون‌های مورد نظر با استفاده از یک لاستیک ۱۲-۲۸ در سه سطح بار عمودی ۶، ۹ و ۱۲ کیلونیوتن، سه سطح فشار باد ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ کیلوپاسکال و سه سطح رطوبتی ۱۱/۲۰، ۱۴/۸۶ و ۱۸/۶۸ درصد و با سرعت پیشروی ۰/۴۵ متر بر ثانیه

مربع محاسبه گردید. فشار تماسی متوسط برای یک مساحت تماسی و بار عمودی مشخص با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (Schjønning *et al.*, 2008).

$$P = \frac{F_{\text{wheel}}}{A} \quad (1)$$

که در آن،

P = میانگین فشار تماسی لاستیک با سطح خاک؛
 F_{wheel} = بار عمودی روی لاستیک؛ و A = مساحت تماسی به دست آمده با استفاده از روش پردازش تصویر.

رد اثر و به منظور تخمین مساحت آن، با استفاده از نرم افزار از یک شاخص مربعی شکل با طول ضلع ۵ سانتی متر استفاده گردید. تصویرهای گرفته شده، با استفاده از تکنیک پردازش تصویر و با استفاده از نرم افزار MATLAB R2014b تجزیه و تحلیل شدند. برای استخراج رد اثر لاستیک از تصویر اصلی، ابتدا تصویر مورد نظر به تصویر باینری^۱ تبدیل شد (شکل ۲). به منظور جداسازی مناسب مرز بین سیاه و سفید، مقدار مناسب ۰/۵۵ برای آستانه^۲ در این تحقیق با استفاده از روش آزمون و خطا انتخاب و مساحت تصویرها برای هر تیمار بر حسب سانتی متر

جدول ۲- خلاصه‌ای از پارامترهای مورد آزمون

متغیرهای مستقل			متغیرهای وابسته
رطوبت (% d.b.)	فشار باد (کیلوپاسکال)	بار عمودی (کیلونیوتن)	
۱۱/۲۰	۸۰	۶	مساحت تماسی
۱۴/۸۶	۱۲۰	۹	مقاومت به نفوذ
۱۸/۶۸	۱۶۰	۱۲	هدایت الکتریکی ظاهری



شکل ۲- رد اثر ایجاد شده روی خاک؛ فضای RGB (چپ) و فضای باینری (راست)

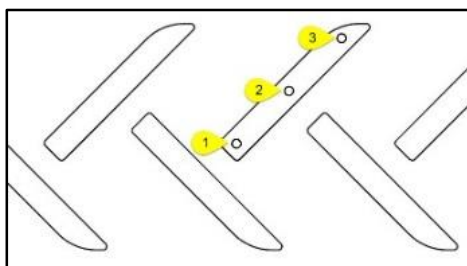
مقاومت به نفوذ در سه نقطه اندازه‌گیری شد: مرکز، میانه و کناره آج لاستیک (شکل ۳). نفوذسنج به‌ازای هر سانتی متر نفوذ در داخل خاک، یک مقدار اندازه‌گیری شده را ثبت می‌کرد. اندازه‌گیری‌ها در هر نقطه و برای هر تیمار سه بار تکرار شد.

با نفوذسنج دستی (Eijkelkamp, PENETROLOGGER ART, NR, 06.15.01، ساخت کشور هلند)، دارای مخروط ۳۰ درجه و سطح مقطع ۱ سانتی متر مربع، مقاومت به نفوذ خاک قبل و بعد از عبور لاستیک اندازه‌گیری شد. برای این منظور، قبل و بعد از عبور لاستیک،

1- Binary

2- Threshold

پیش بینی فشار تماسی و مقاومت به نفوذ خاک با اندازه گیری...



شکل ۳- نقاط اندازه گیری پارامتر مقاومت به نفوذ؛ ۱- مرکز، ۲- میانه و ۳- کناره

حرکت جریان الکتریسیته اثر می گذارد (Barzegar, 2008). برای اندازه گیری هدایت الکتریکی از EC سنج قابل حمل (LandMapper ساخت شرکت Landviser) استفاده شد (شکل ۴). نتایج به دست آمده از قرائت مقادیر هدایت الکتریکی ظاهری در ثابت محفظه یا سلول (که در این تحقیق برابر با ۰/۴۱ است) ضرب و بر حسب واحد میلی زیمنس ثبت گردید.

برای بررسی اثر فشردگی بر تغییرات هدایت الکتریکی خاک، مقدار این پارامتر قبل و بعد از عبور لاستیک در زیر رد اثر آج و با عبور دادن جریان الکتریسیته از خاک اندازه گیری شد. عبور جریان الکتریسیته تابع درصد اشباع، تخلخل، دما و درصد رس خاک است زیرا درجه اشباع خاک مقدار جریان الکتریسیته را کنترل می کند و همچنین تخلخل خاک بر پیچ و خم های مسیر و همین طور مسیر

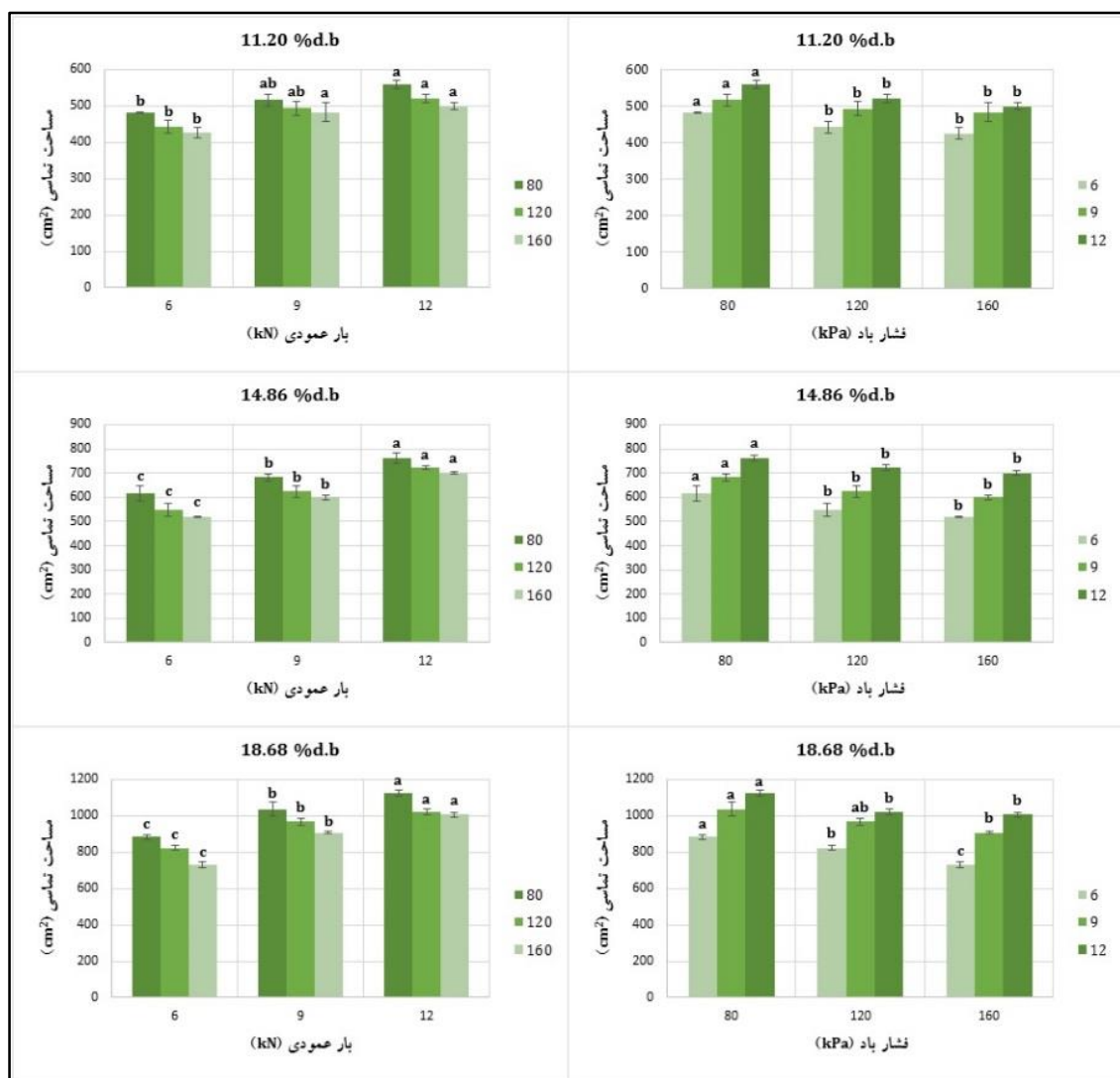


شکل ۴- اندازه گیری هدایت الکتریکی در زیر رد اثر آج لاستیک

سطح فشار باد لاستیک در تمامی سطوح رطوبتی همراه با نتایج حاصل از آزمون مقایسه ای دانکن در سطح معنی داری ۵ درصد در شکل ۵ ارائه شده است. با توجه به شکل ۵، مساحت تماسی لاستیک با خاک با افزایش بار عمودی در یک فشار باد ثابت، افزایش (Mohsenimanesh & Ward, 2010) و با افزایش فشار باد در یک بار عمودی ثابت، کاهش پیدا می کند (Taghavifar & Mardani, 2013a).

نتایج و بحث

آنالیز تجزیه واریانس (ANOVA) اثر متغیرهای بار عمودی، فشار باد لاستیک و رطوبت خاک بر پارامتر مساحت تماسی نشان می دهد که اثر مستقل و متقابل تمامی متغیرهای مورد آزمون، به جز اثر متقابل بار عمودی \times فشار باد لاستیک، بر مساحت تماسی معنی دار است. مقادیر مساحت تماسی لاستیک با خاک برای سه سطح بار عمودی و سه



شکل ۵- تغییرات مساحت تماسی همراه با نتایج حاصل از آزمون مقایسه میانگین دانکن (نوار خطی بالای هر ستون نشان‌دهنده خطای استاندارد است)

به‌خود می‌گیرد. با افزایش بار عمودی در فشار باد ثابت، تغییر شکل لاستیک و خاک در محل تماس افزایش می‌یابد. افزایش معنی‌دار مساحت تماسی به‌طور نسبی در تغییر بار عمودی از ۶ به ۱۲ کیلونیوتن ایجاد شده است. با توجه به مقاومت خاک در برابر تغییر شکل در این سطح رطوبتی، تغییر شکل ایجاد شده در محل تماس با خاک بیشتر مربوط به لاستیک است. در سطح رطوبتی دوم نیز مساحت تماسی لاستیک با خاک با افزایش فشار باد لاستیک کاهش پیدا می‌کند، اما این مقدار افزایش

می‌توان مشاهده کرد که در سطح رطوبتی ۱۱/۲۰ درصد و در یک بار عمودی ثابت، مساحت تماسی با افزایش فشار باد لاستیک کاهش پیدا می‌کند. از آنجا که در این سطح رطوبتی مقاومت خاک در برابر تغییر شکل نسبتاً بالاست، کاهش معنی‌دار در مساحت تماسی تنها با افزایش فشار باد لاستیک از ۸۰ به ۱۲۰ کیلو پاسکال به‌دست می‌آید و با افزایش بیشتر در فشار باد لاستیک کاهش معنی‌داری در مساحت تماسی به‌دست نمی‌آید و سطح اتکای لاستیک با خاک مقداری نسبتاً ثابت

دهد. در کل، هر دو پارامتر بار عمودی و فشار باد لاستیک سطح تماسی لاستیک با خاک را تحت تأثیر قرار می دهند (Schjønning *et al.*, 2008; Diserens, 2009; Taghavifar & Mardani, 2013b). در رطوبت‌های متفاوت، تأثیر این دو پارامتر بر مساحت تماسی متفاوت ظاهر می شود، اما می توان تأثیر فشار باد لاستیک در سطوح رطوبتی پایین را بیشتر احساس کرد. می توان گفت که در سطوح رطوبتی پایین، مقاومت خاک در برابر تغییر شکل زیاد است و تغییر مساحت تماسی وابسته خواهد بود به تغییر شکل لاستیک و چون فشار باد تغییر شکل لاستیک را تحت تأثیر قرار می دهد، بنابراین فشار باد لاستیک پارامتر کنترل کننده مساحت تماسی در رطوبت‌های پایین است. اما در سطوح رطوبتی بالا تأثیر پارامتر بار عمودی بر مساحت تماسی خودنمایی بیشتری دارد. دلیل این امر را می توان به مقاومت کمتر خاک، در مقایسه با مقاومت بیشتر لاستیک، در مقابل تغییر شکل مربوط دانست.

فشار تماسی متوسط لاستیک با خاک برای تمامی تیمارهای مورد آزمون با استفاده از رابطه ۱ و مساحت به دست آمده از روش پردازش تصویر محاسبه شده است (شکل ۶). در اینجا می بینیم که فشار تماسی متوسط با افزایش بار عمودی، فشار باد لاستیک و رطوبت خاک روندی افزایشی داشته است.

با توجه به اینکه متغیر مساحت تماسی لاستیک با خاک با تغییر متغیرهای بار عمودی، فشار باد لاستیک و رطوبت خاک دچار تغییر می شود و فشار تماسی متوسط متغیری شناخته می شود وابسته به پارامتر مساحت تماسی لاستیک با خاک، بنابراین می توان مدلی رگرسیونی را برای ایجاد ارتباط بین این دو نوع متغیر ارائه داد. مدل رگرسیونی چند متغیره با استفاده از متغیرهای بار عمودی، فشار باد و رطوبت خاک به دست آمد. مدل رگرسیونی برای پیش بینی فشار تماسی با مقدار ضریب تبیین تعدیل

در تغییر فشار باد از ۸۰ به ۱۲۰ کیلوپاسکال معنی دار می باشد و با افزایش بیشتر در فشار باد تغییر معنی داری در مساحت تماسی به دست نمی آید. از طرفی، تغییر بار عمودی برای هر سه سطح فشار باد لاستیک موجب افزایش معنی دار در مساحت تماسی می شود. در فشار باد ۸۰ کیلوپاسکال، با افزایش بار عمودی به ۱۲ کیلونیوتن، تغییر شکل بیشتر لاستیک و خاک دیده می شود و بیشترین مساحت تماسی ایجاد می گردد.

در سطح رطوبتی ۱۸/۶۸ درصد که خاک مقاومت چندانی در برابر تغییر شکل ندارد، در بار عمودی ۱۲ کیلو نیوتن افزایش فشار باد از ۸۰ به ۱۲۰ کیلو پاسکال موجب کاهش معنی دار در مساحت تماسی می شود زیرا با سخت شدن لاستیک، مقاومت آن در برابر تغییر شکل بیشتر می شود و مساحت کمتری در ناحیه تماس با خاک ایجاد می کند. اما با افزایش بیشتر فشار باد، این کاهش تغییر معنی داری به دنبال نخواهد داشت زیرا به دلیل سستی بافت خاک تغییر شکل ایجاد شده در آن در اثر افزایش فشار باد از ۱۲۰ به ۱۶۰ کیلوپاسکال تفاوت معنی داری نخواهد داشت.

در بار عمودی ۶ کیلو نیوتن، تغییر فشار باد در هر سه سطح، تغییر معنی دار مساحت تماسی را به دنبال خواهد داشت. دلیل این امر را می توان بافت سست خاک در برابر تغییر شکل و تغییر معنی دار مساحت تماسی به ازای افزایش فشار باد در بار عمودی ثابت دانست. از طرفی، با افزایش بار عمودی برای تمامی سطوح فشار باد، مساحت تماسی با افزایش معنی داری تغییر می کند. می توان گفت که در این سطح رطوبتی، تغییر در بار عمودی تغییر در سطح تماسی را با روندی مشخص کنترل می کند و بنابراین تغییر در بار عمودی می تواند مساحت تماسی و از طرفی توزیع تنش در سطح تماسی لاستیک و خاک و نیز فشردگی را تحت تأثیر قرار

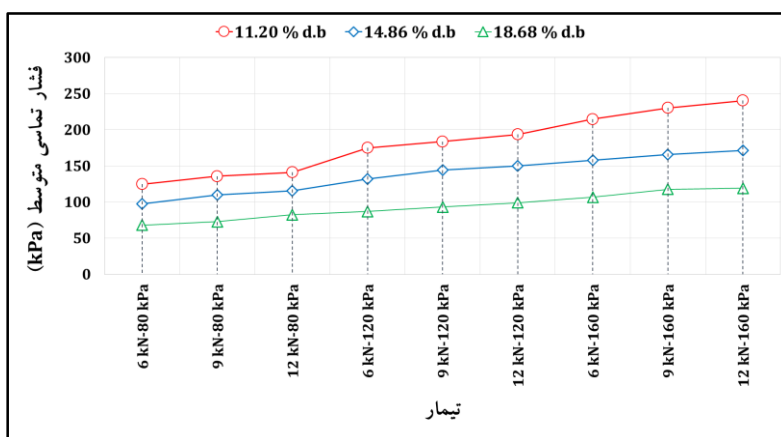
$$CP = 10.675W + 0.208P - 11.783 + 192.742 \quad (2)$$

که در آن،

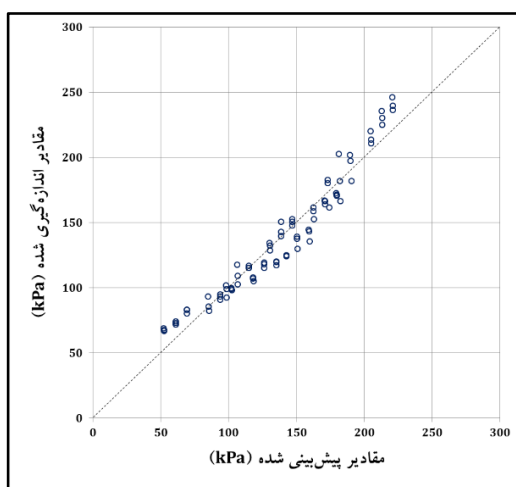
CP = فشار تماسی^۱ (کیلوپاسکال)؛ W = بار عمودی بر روی لاستیک (کیلو نیوتن)؛ P = فشار باد لاستیک (کیلوپاسکال)؛ و M = رطوبت خاک (% d. b).

در شکل ۷، مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از مدل ارائه شده، نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده، ارائه شده است ($R^2 = 0.946$).

شده ۰/۹۴۶ و خطای استاندارد ۱۱/۰۶۷ در رابطه ۲ مدل رگرسیونی ارائه شده با دو متغیر بار عمودی و رطوبت خاک رابطه مثبت و با متغیر فشار باد رابطه منفی دارد. همبستگی مدل ارائه شده با پارامترهای بار عمودی، فشار باد و رطوبت خاک به ترتیب برابر با ۰/۹۲۴، ۰/۵۳۳ و -۰/۷۷۸ است. مقادیر همبستگی ارائه شده نشان می‌دهند که آثرگذارترین پارامترها بر فشار تماسی به ترتیب برابر با بار عمودی، رطوبت خاک و فشار باد هستند. همبستگی منفی با رطوبت به دلیل افزایش مساحت با افزایش رطوبت و در نتیجه کاهش فشار تماسی است.



شکل ۶- فشار تماسی متوسط در سطوح رطوبتی متفاوت

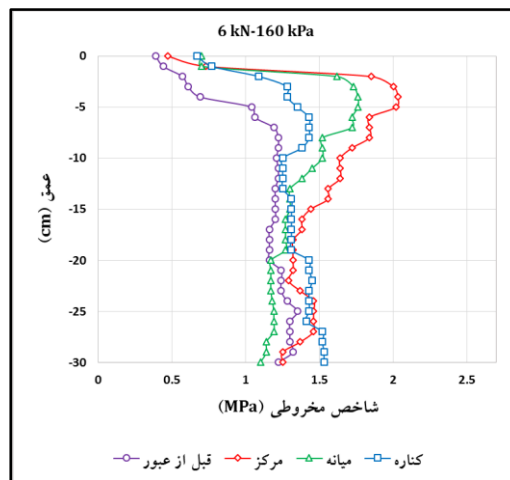


شکل ۷- مقادیر پیش‌بینی شده تنش تماسی با خاک با استفاده از مدل ارائه شده نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده

پیش بینی فشار تماسی و مقاومت به نفوذ خاک با اندازه گیری...

نفوذ به منظور استفاده به عنوان پارامتری برای اندازه گیری فشردگی خاک است. با توجه به نمودارهای به دست آمده و مشاهده بیشتر تغییرات مقاومت به نفوذ تا عمقی در حدود ۱۵ سانتی متر، داده های مورد نظر تا این عمق بررسی شدند (شکل ۸).

مقدار فشردگی خاک قبل و بعد از عبور لاستیک در سه ناحیه از رد اثر، با نفوذسنج عمودی اندازه گیری گردید. مقاومت به نفوذ خاک برای حالت بعد از عبور لاستیک بیشتر از مقدار آن قبل از عبور مشاهده شد (McDonald *et al.*, 1996) که نشان دهنده کاربرد شاخص مقاومت به



شکل ۸- تغییرات مقاومت به نفوذ، قبل و بعد از عبور در سه ناحیه مرکز، میانه و کناره رد اثر لاستیک

بررسی داده ها این نکته را نشان می دهد که در تمامی سطوح رطوبتی، میانگین مقاومت به نفوذ تا عمق ۱۵ سانتی متری بیشترین مقادیر را به ترتیب در مرکز، میانه و کناره رد اثر ثبت می کند. برای سطح رطوبتی ۱۱/۲۰ درصد این نکته قابل تشخیص است که در هر سه ناحیه اندازه گیری شده مقدار مقاومت به نفوذ در عمق ۵ سانتی متری معمولاً بیشترین مقدار را ثبت می کند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که در عبور اول روی سطح خاک یک لایه سخت در عمق تقریبی ۵ سانتی متری شکل خواهد گرفت و با توجه به پتانسیل پایین خاک نسبت به تغییر شکل در این رطوبت، خاک در این لایه حالت تراکمی بالایی به خود می گیرد. با افزایش رطوبت خاک به ۱۴/۸۶ درصد، کاهش نسبی در مقاومت خاک ایجاد و پتانسیل آن برای دریافت تغییر شکل بیشتر

افزایش می یابد. از طرفی، بیشترین مقدار اندازه گیری شده معمولاً تا عمق ۵ سانتی متری دیده می شود که بیانگر ایجاد لایه ای سخت در سطح خاک است. با افزایش بار عمودی در فشار باد ۱۶۰ کیلو پاسکال، مقدار مقاومت به نفوذ در میانه لاستیک به مقدار آن در مرکز لاستیک نزدیک می شود. در سطح رطوبتی ۱۸/۶۸ درصد با افزایش فشار باد لاستیک به ۱۶۰ کیلو پاسکال و سخت شدن آن، مقدار مقاومت به نفوذ در مرکز لاستیک با فاصله ای نسبتاً زیاد نسبت به دو ناحیه میانه و کناره تغییر می کند. بنابراین، سخت شدن لاستیک موجب تماس بیشتر مرکز لاستیک روی خاک و در نتیجه افزایش بیشتر مقاومت به نفوذ در این ناحیه می شود. با افزایش فشار باد در یک بار عمودی ثابت، مقدار مقاومت به نفوذ در هر سه ناحیه و به خصوص در مرکز رد اثر افزایش می یابد و

می‌توان دید که افزایش همزمان دو پارامتر بار عمودی و فشار باد لاستیک، عمق ایجاد لایه سخت را تا حدود ۱۰ سانتی‌متر افزایش می‌دهد.

پس از بررسی داده‌های هدایت الکتریکی ظاهری خاک، قبل و بعد از عبور لاستیک و مشاهده مقدار رشد میانگین ۵۱، ۶۰ و ۸۴ درصد به ترتیب در سطوح رطوبتی ۱۱/۲۰، ۱۴/۸۶ و ۱۸/۶۸ درصد، تأثیر فشردگی خاک بر افزایش هدایت الکتریکی ظاهری مشاهده گردید. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش رطوبت خاک، رشد تغییرات هدایت الکتریکی ظاهری نیز بیشتر می‌شود. تجزیه واریانس داده‌های تغییرات هدایت الکتریکی ظاهری خاک، قبل و بعد از عبور لاستیک در هر سطح رطوبتی، معنی‌دار بودن اثر مستقل بار عمودی و فشار باد لاستیک را بر هدایت الکتریکی خاک تأیید می‌کند. اثر متقابل تمامی متغیرهای مورد آزمون، به جز اثر متقابل بار عمودی × فشار باد لاستیک و بار عمودی × فشار باد لاستیک × رطوبت خاک بر تغییرات هدایت الکتریکی معنی‌دار است. مقایسه میانگین داده‌ها بر روی اثر مستقل بار عمودی و فشار باد لاستیک انجام شد و نتایج آن بر اساس آزمون مقایسه میانگین دانکن در هر سطح رطوبتی مورد بحث قرار گرفت.

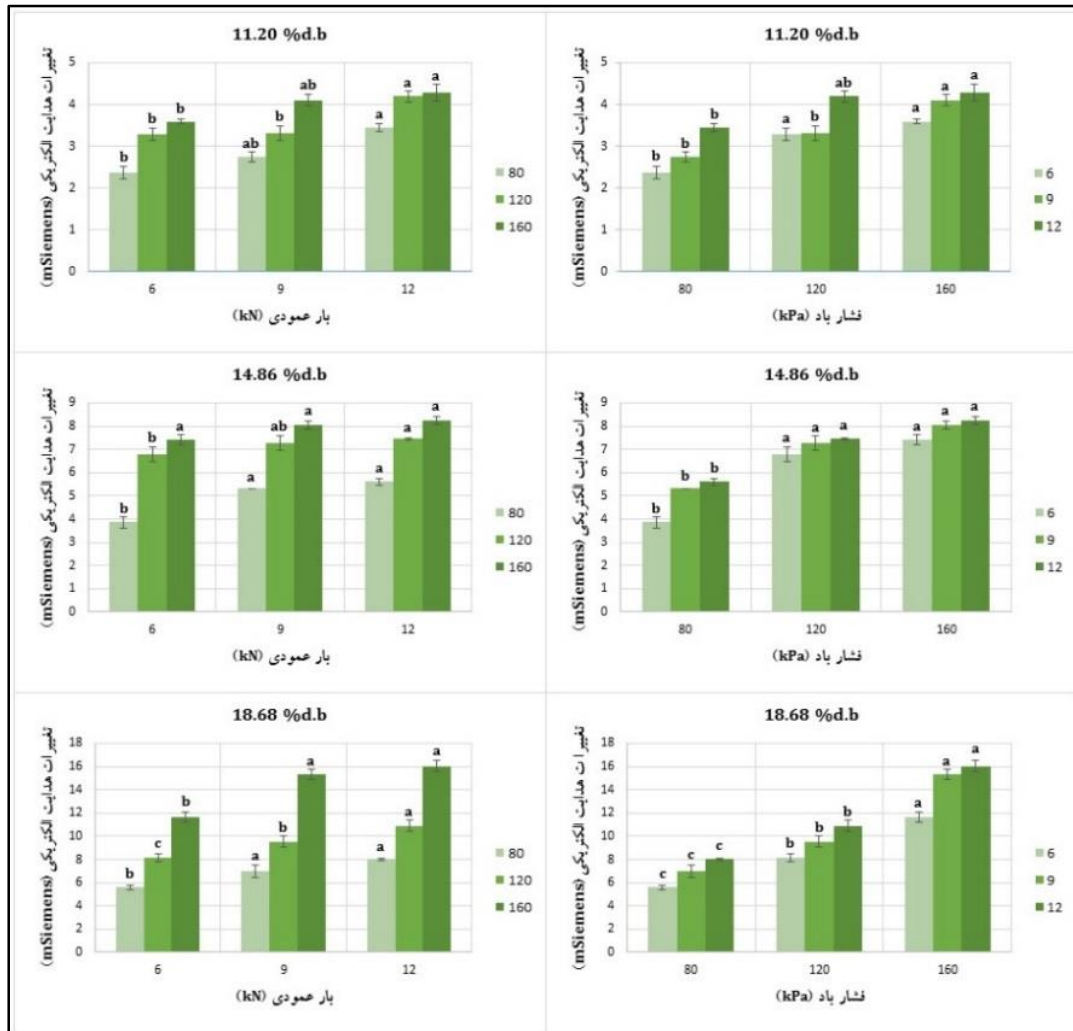
همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با افزایش بار عمودی در یک فشار باد ثابت و همچنین افزایش فشار باد لاستیک در یک بار عمودی ثابت، تغییرات هدایت الکتریکی ظاهری در زیر آج لاستیک افزایش پیدا می‌کند. دلیل این موضوع را می‌توان تراکم خاک و در نتیجه کاهش تخلخل و مناسب‌تر شدن مسیر جریان الکتریسیته دانست (Barzegar, 2008). در سطح رطوبتی ۱۱/۲۰ درصد، افزایش بار عمودی در فشار باد ثابت، در مقایسه با افزایش فشار باد در بار عمودی ثابت، روندی نسبتاً

منظم‌تر در ایجاد اختلاف معنی‌دار در تغییرات هدایت الکتریکی ظاهری خاک دارد. در این سطح رطوبتی، به دلیل مقاومت نسبتاً زیاد خاک در برابر تغییر شکل، افزایش زیادی در تغییرات هدایت الکتریکی ظاهری ایجاد نمی‌شود. با افزایش رطوبت و رسیدن آن به سطح ۱۴/۸۶ درصد، قابلیت خاک برای تغییر شکل افزایش پیدا می‌کند و از این رو مقدار افزایش در هدایت الکتریکی ظاهری خاک فشرده شده بعد از عبور لاستیک، در مقایسه با رطوبت ۱۱/۲۰ درصد بیشتر است. تأثیر فشار باد لاستیک در بار عمودی ثابت در سطح رطوبتی ۱۴/۸۶ درصد را می‌توان در نمودارهای ارائه شده در ردیف دوم شکل ۹ مشاهده کرد به صورتی که برای هر سه سطح بار عمودی، افزایش تغییرات هدایت الکتریکی، به دلیل افزایش در فشار باد لاستیک، قابل مشاهده است. دلیل این افزایش را می‌توان سخت شدن لاستیک در اثر افزایش فشار باد و در نتیجه فشرده کردن بیشتر خاک دانست. با افزایش رطوبت به ۱۸/۶۸ درصد و آزمایش خاک در شرایط مختلف بار عمودی و فشار باد لاستیک، بیشترین مقدار افزایش در هدایت الکتریکی خاک بعد از عبور لاستیک در بار عمودی ۱۲ کیلونیوتن و فشار باد ۱۶۰ کیلوپاسکال ثبت شده است. با توجه به نمودارهای ردیف سوم شکل ۹، افزایش بار عمودی به‌ازای فشار باد ثابت، روندی مشخص برای معنی‌دار کردن تغییرات ایجاد نمی‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش فشار باد لاستیک افزایش معنی‌داری در پارامتر تغییرات هدایت الکتریکی برای هر سه سطح بار عمودی ایجاد می‌کند. مقاومت خاک تحت تأثیر حضور آب در منافذ و همچنین ساختار فیزیکی آن قرار دارد، زیرا هندسه منافذ، فاز آبی موجود در خاک و در نتیجه مسیر جریان الکترون را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Gingine et al.,

پیش بینی فشار تماسی و مقاومت به نفوذ خاک با اندازه گیری...

رطوبتی بالاتر افزایش فشار باد لاستیک را عامل کنترل کننده تغییرات در هدایت الکتریکی شناخت.

(2016). با توجه به چگونگی تغییرات هدایت الکتریکی خاک برای سه سطح رطوبتی، می توان در رطوبت پایین خاک افزایش بار عمودی و در سطوح



شکل ۹- تغییرات هدایت الکتریکی خاک با توجه به سطوح بار عمودی و باد لاستیک در سه سطح رطوبتی (نوار خطی بالای هر ستون نشان دهنده خطای استاندارد است)

آمده برای پیش بینی تغییرات هدایت الکتریکی خاک در رابطه ۳ با مقدار ضریب تبیین ۰/۸۵۰ و خطای استاندارد ۱/۴۰۱ ارائه شده است.

مدل رگرسیونی با هر سه متغیر بار عمودی، فشار باد لاستیک و رطوبت خاک رابطه مثبت دارد و همبستگی آن با این پارامترها به ترتیب برابر با ۰/۴۵۶، ۰/۷۵۶ و ۰/۸۹۶ است. این مقادیر نشان

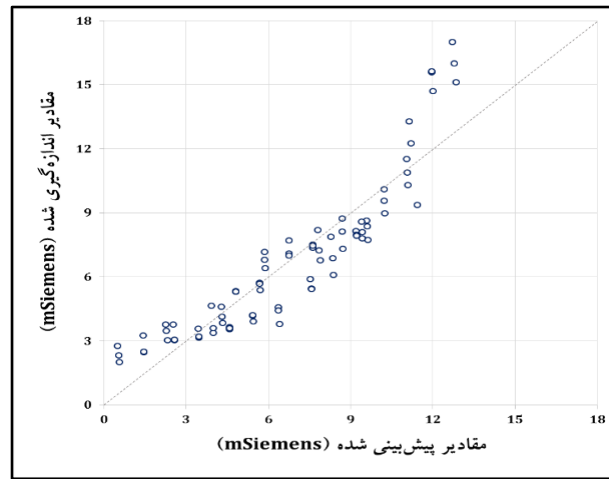
متغیر وابسته هدایت الکتریکی خاک با تغییر متغیرهای بار عمودی، فشار باد لاستیک و رطوبت خاک دچار تغییر می شود، بنابراین می توان مدلی رگرسیونی برای ایجاد ارتباط بین این دو نوع متغیر ارائه داد. مدل رگرسیونی چند متغیره با استفاده از متغیرهای بار عمودی، فشار باد لاستیک و همچنین رطوبت خاک به دست آمد. مدل رگرسیونی به دست

EC = تغییرات هدایت الکتریکی خاک بعد از عبور لاستیک (میلی‌زیمنس)؛ W = بار عمودی روی لاستیک (کیلو نیوتن)؛ P = فشار باد لاستیک (کیلو پاسکال)؛ و M = رطوبت خاک (% d. b) است. مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از مدل، نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده، در شکل ۱۰ نمایش داده شده است ($R^2=0/850$).

می‌دهند که تأثیرگذارترین پارامتر بر تغییرات هدایت الکتریکی خاک به ترتیب رطوبت خاک، فشار باد و بار عمودی است.

$$EC = 0.286W + 0.048P + 0.904M - 15.057 \quad (3)$$

که در آن،



شکل ۱۰- مقادیر پیش‌بینی شده تغییرات هدایت الکتریکی ظاهری خاک فشرده شده با استفاده از مدل ارائه شده، نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده

رابطه ۴ با مقدار ضریب تبیین ۰/۶۴۸ و خطای استاندارد ۰/۰۹۲ ارائه شده است.

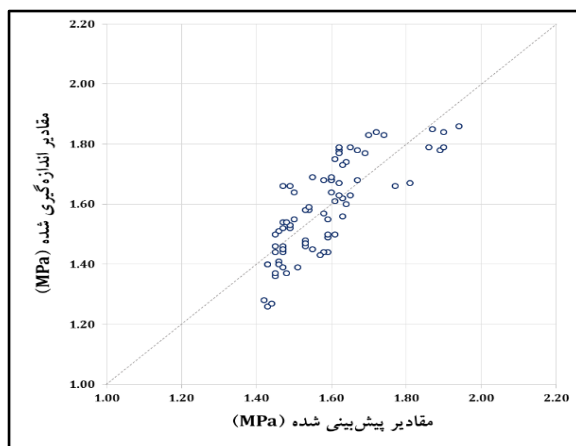
$$CI = 0.035EC + 1.342 \quad (4)$$

که در آن،

CI = مقاومت به نفوذ خاک فشرده شده (مگا پاسکال)؛ و EC = تغییرات هدایت الکتریکی ظاهری خاک فشرده شده نسبت به خاک دست نخورده (میلی‌زیمنس)؛.

مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از مدل ارائه شده، نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده، در شکل ۱۱ نمایش داده شده است ($R^2=0/648$).

با توجه به متغیر بودن تغییرات هدایت الکتریکی خاک، نسبت به میزان فشردگی خاک، می‌توان مقاومت به نفوذ خاک را تابعی از تغییرات هدایت الکتریکی ظاهری خاک در نظر گرفت. برای این منظور، میانگین مقدار مقاومت به نفوذ در سه ناحیه مرکز، میانه و کناره رد اثر لاستیک به‌عنوان پارامتر فشردگی برای هر تیمار در نظر گرفته شد و با استفاده از مدل رگرسیونی تک متغیره ارتباط این دو متغیر بررسی شد. بر این اساس، مدل رگرسیونی به‌دست آمده برای پیش‌بینی مقاومت به نفوذ بر حسب تغییرات هدایت الکتریکی ظاهری خاک در



شکل ۱۱- مقادیر پیش‌بینی شده مقاومت به نفوذ خاک با استفاده از مدل ارائه شده، نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده

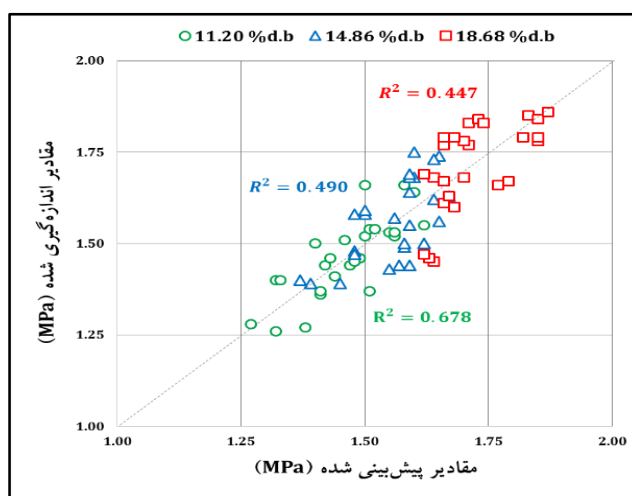
همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب تبیین مدل برای پیش‌بینی فشردگی نسبتاً پایین است زیرا متغیر رطوبت خاک موجب افزایش جهشی نسبتاً بزرگ در تغییرات هدایت الکتریکی ظاهری خاک می‌شود؛ از این‌رو سه مدل رگرسیونی جدا برای هر رطوبت پیشنهاد می‌گردد. روابط ۵ تا ۷ سه مدل مستقل ارائه شده با مقدار ضریب تبیین ۰/۶۷۸، ۰/۴۹۰ و ۰/۴۴۷ را به ترتیب برای سطوح

رطوبتی ۱۱/۲۰، ۱۴/۸۶ و ۱۸/۶۸ درصد نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ضریب تبیین مدل‌های ارائه شده با افزایش رطوبت کاهش می‌کند، زیرا رطوبت عامل اصلی تأثیرگذاری بر هدایت الکتریکی ظاهری خاک است. بنابراین، در رطوبت‌های نزدیک به حد پلاستیک خاک، دقت روش تخمین فشردگی با استفاده از تغییرات هدایت الکتریکی کاهش پیدا می‌کند.

$$CI = 0.129EC - 1.016 \quad \text{سطح رطوبتی ۱۱/۲۰ درصد} \quad (۵)$$

$$CI = 0.054EC + 1.195 \quad \text{سطح رطوبتی ۱۴/۸۶ درصد} \quad (۶)$$

$$CI = 0.023EC + 1.485 \quad \text{سطح رطوبتی ۱۸/۶۸ درصد} \quad (۷)$$



شکل ۱۲- مقادیر پیش‌بینی شده مقاومت به نفوذ خاک با استفاده از سه مدل رگرسیونی مستقل برای هر رطوبت نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده

نتیجه‌گیری

خوبی بیان می‌کند.

- عامل کنترل کننده در تغییرات هدایت الکتریکی ظاهری خاک در سطوح رطوبتی پایین، بار عمودی روی لاستیک و در سطوح رطوبتی بالاتر، فشار باد لاستیک شناخته شده است. می‌توان تغییرات هدایت الکتریکی ظاهری را با ضریب تبیین مناسبی، نسبت به سه متغیر بار عمودی، فشار باد لاستیک و رطوبت خاک، پیش‌بینی کرد ($R^2=0/85$).

- ضریب تبیین مدل‌های ارائه شده برای پیش‌بینی پارامتر مقاومت به نفوذ خاک با استفاده از تغییرات هدایت الکتریکی ظاهری با افزایش رطوبت کاهش پیدا می‌کند زیرا رطوبت عاملی اصلی در تأثیر گذاری بر هدایت الکتریکی ظاهری است. بنابراین، در رطوبت‌های نزدیک به حد پلاستیک خاک، دقت روش تخمین فشردگی با استفاده از تغییرات هدایت الکتریکی ظاهری خاک کاهش پیدا می‌کند.

در این مقاله تأثیر بار عمودی، فشار باد لاستیک و رطوبت بر مساحت تماسی، تنش تماسی، فشردگی و تغییرات هدایت الکتریکی ظاهری خاک بررسی شد و نتایج زیر به دست آمد:

- متغیرهای بار عمودی، فشار باد لاستیک و رطوبت خاک بر مساحت تماسی تأثیر می‌گذارند.

- پارامتر کنترل‌کننده مساحت تماسی در رطوبت‌های پایین، فشار باد لاستیک است. در سطوح رطوبتی بالا، تأثیر پارامتر بار عمودی بر مساحت تماسی خودنمایی بیشتری دارد.

- مدل رگرسیونی ارائه شده برای پیش‌بینی فشار تماسی با استفاده از پارامترهای بار عمودی، فشار باد و رطوبت، دارای ضریب تبیین مناسبی برای پیش‌بینی است ($R^2=0/946$) و برتری استفاده از مساحت تماسی را برای پیش‌بینی فشار تماسی به

قدردانی

نویسندگان از آقایان حسین سراج، نقی محبی و مهدی نظیری کارکنان آزمایشگاه دینامیک خاک موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی برای همکاری در اجرای این تحقیق سپاسگزاری می‌نمایند.

مراجع

- Barzegar, A. 2008. Salt-affected Soils: Diagnosis and Productivity (Second Ed.): Shahid Chamran University. (in Persian)
- Diserens, E. 2009. Calculating the contact area of trailer tyres in the field. Soil Till. Res. 103(2): 302-309.
- Diserens, E., Défossez, P., Duboisset, A. and Alaoui, A. 2011. Prediction of the contact area of agricultural traction tyres on firm soil. Biosyst. Eng. 110(2): 73-82.
- Gill, W. R. 1990. A history of the USDA National tillage machinery laboratory. Agricultural Research Service, US Department of Agriculture Auburn, Alabama.
- Gingine, V., Dias, A. S. and Cardoso, R. 2016. Compaction control of clayey soils using electrical resistivity charts. Procedia Eng. 143, 803-810.
- Grečenko, A. 1995. Tyre footprint area on hard ground computed from catalogue values. J. Terramech. 32(6): 325-333.
- Hallonborg, U. 1996. Super ellipse as tyre-ground contact area. J. Terramech. 33(3): 125-132.

- Jacobs, C. O. and Finney, J. B. 1993. Soil Management. Farming Press Pub.
- McDonald, T., Way, T., Lofgren, B., Seixas, F. and Landstrom, M. 1996. Load and inflation pressure effects on soil compaction of forwarder tires. Available at <http://www.srs.fs.usda.gov>.
- Mohsenimanesh, A. and Ward, S. M. 2010. Estimation of a three-dimensional tyre footprint using dynamic soil-tyre contact pressures. *J. Terramech.* 47(6): 415-421.
- Schjønning, P., Lamandé, M., Tøgersen, F. A., Arvidsson, J. and Keller, T. 2008. Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil-tyre interface. *Biosyst. Eng.* 99(1): 119-133.
- Sharifi-Malvajardi, A., Younesi-Alamouti, M. and Godwin, R. J. 2011. The effect of a flexible carcass tyre inflation pressure on some soil compaction related factors. *Watershed Manage. Res. (Pajouhesh & Sazandegi)*. 91, 43-48. (in Persian)
- Sharifi-Malvajardi, A., Younesi-Alamouti, M. and Mohsenimanesh, A. 2013. The effect of load and inflation pressure of a stiff carcass tyre on some soil compaction related factors measured in the soil bin. *J. Agric. Mach.* 3(1): 1-8. (in Persian)
- Sharifi, A., Godwin, R., O'Dogherty, M. and Dresser, M. 2007. Evaluating the performance of a soil compaction sensor. *Soil Use Manage.* 23(2): 171-177.
- Steiner, M. 1979. Analyse, synthese und berechnungsmethoden der triebkraft-schlupf-kurve von luftreifen auf nachgiebigem boden. Ph. D. Thesis. Technology University, Munich, Germany.
- Taghavifar, H. and Mardani, A. 2013a. Investigating the effect of velocity, inflation pressure, and vertical load on rolling resistance of a radial ply tire. *J. Terramech.* 50(2): 99-106.
- Taghavifar, H. and Mardani, A. 2013b. Potential of functional image processing technique for the measurements of contact area and contact pressure of a radial ply tire in a soil bin testing facility. *Measurement.* 46(10): 4038-4044.
- Zareian, S. 1985. The effect of soil moisture content on plow draft and the degree of pulverization. *Iran. J. Agric. Sci.* 16, 11-16. (in Persian)



Prediction of Contact Pressure and Soil Penetration Resistance by Measuring Tyre Contact Area and Soil Apparent Electrical Conductivity

P. Farhadi, A. Golmohammadi, A. Sharifi-Malvajerdi* and G. H. Shahgholi

* Corresponding Author: Associate Professor, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. Email: ahmadsharifi47@yahoo.com

Received: 15 January 2016, Accepted: 26 July 2017

Abstract

One of the most important issues in agricultural machinery section is tyre - soil interactions. In this study, a single wheel tester was used to follow experiments in controlled conditions in a soil bin. A Goodyear 12.4-28, 6 ply tractor drive tyre was operated at three vertical loads of 6, 9 and 12 kN, three inflation pressures of 80, 120 and 160 kPa and three moisture content of soil: 11.20, 14.86 and 18.68 % d.b to investigate the effect of the variables on these parameters: contact area, contact pressure, compaction, and soil apparent electrical conductivity. It was found that medium contact pressure had a direct relation with vertical load, inflation pressure and moisture content. A regression model with R-square of 0.946 was achieved to predict contact pressure. Soil electrical conductivity changes was predicted with acceptable determination coefficient of 0.850 by using of vertical load, inflation pressure and moisture content. Determination coefficient magnitude for models to predict resistance to soil penetration (cone index) using soil apparent electrical conductivity ,decreased when moisture content was increased. The vertical load and inflation pressure were found two factors controlling the soil apparent electrical conductivity changes in low and high moisture content, respectively. Error percentage in using soil apparent electrical conductivity parameter to estimate the penetration resistance increased with increasing moisture content.

Keywords: Soil Bin, Soil Cone Index, Tyre Inflation Pressure, Tyre Tester, Vertical Load