



استخراج مدلی بهینه برای پیش‌بینی مقاومت کششی ابزار خاک‌ورز بر اساس محتوای رطوبت و

جرم مخصوص ظاهری خاک

علی حاجی‌احمد^۱، سید احمد طباطبایی‌فر^۲، ارژنگ جوادی^۳، علیرضا کیهانی^۲، رضا لبافی^۴

^۱ دانشجوی دکتری گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران (hajjahmad@ut.ac.ir)

^۲ استاد گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران

^۳ دانشیار پژوهشی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج

^۴ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران

چکیده

فشردگی خاک یکی از عوامل مهم کاهش عملکرد محصولات کشاورزی، افزایش انرژی مورد نیاز ادوات کشاورزی، آلودگی محیط زیست و بسیاری اثرات مخرب دیگر می‌باشد. فشردگی خاک را می‌توان تحت عنوان نزدیک شدن ذرات جامد خاک به یکدیگر و افزایش جرم مخصوص ظاهری و یا کاهش تخلخل تعریف نمود. اما روش‌های مستقیم اندازه‌گیری تخلخل و جرم مخصوص ظاهری مستلزم جدا کردن بخشی از خاک و انتقال آن به آزمایشگاه می‌باشد که خطای زیادی را در اثر تغییر شکل خاک هنگام نمونه‌گیری در پی خواهد داشت. در ضمن در این روش اثر عوامل مهم دیگری مانند محتوای رطوبت و ساختمان خاک نادیده گرفته می‌شود. در این تحقیق اثر جرم مخصوص ظاهری و محتوای رطوبت خاک به عنوان دو متغیر مستقل بر روی مقاومت کششی یک تیغه خاک-ورز در خاک لومی رسی بررسی شده است تا علاوه بر تعیین رفتار این پارامتر در برابر تغییرات این دو متغیر بتوان مدلی ریاضی برای بیان ارتباط آنها با یکدیگر به دست آورد.

به منظور اندازه‌گیری مقاومت کششی تیغه خاک‌ورز، یک دستگاه سوار بر پشت تراکتور مجهز به ثبات الکترونیکی قابل اتصال به کامپیوتر طراحی و ساخته شد و پس از ارزیابی‌های لازم مورد استفاده قرار گرفت. مقاومت کششی خاک توسط یک لودسل که پشت یک تیغه‌ی مستطیلی ساده به عرض پنج سانتی‌متر، ضریب رعنائی ۲/۴ و زاویه‌ی ۶۰ درجه نسبت به افق مستقر شده بود اندازه‌گیری گردید.

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مقاومت کششی با محتوای رطوبت خاک وابستگی بیشتری داشته و جرم مخصوص ظاهری خاک تأثیر کمتری بر روی مقاومت کششی تیغه دارد، به طوری که میزان مقاومت کششی تیغه با افزایش محتوای رطوبت به طور معنی‌داری افزایش یافت. چندین مدل ریاضی برای تخمین مقاومت کششی تیغه ارائه گردید که توسط معیارهای تعداد ضرایب ثابت، تعداد متغیرها، پیچیدگی مدل، ضریب همبستگی، معیار مربع کای و ضریب تعیین تعدیل شده با یکدیگر مقایسه گردیدند و در نهایت مدل چند جمله‌ای با مرتبه چهار و پنج ضریب ثابت با ضریب تعیین ۰/۸۱ و ضریب تعیین تعدیل شده ۰/۷۸ برگزیده شد.

واژه‌های کلیدی: محتوای رطوبت خاک، جرم مخصوص ظاهری، مقاومت کششی، مدل‌سازی ریاضی.

فهرست نمادها

نماد	شرح	یکا
d	عمق کار ابزار خاک‌ورز	(m)
N	تعداد مشاهدات در مطالعه	—
P	تعداد ضرایب در مدل پیش‌بینی کننده نیروی کششی ابزار خاک‌ورز	—
q	بار خارجی وارد بر سطح خاک	(kN/m^2)
r	ماتریس ضرایب همبستگی	—
y_0	مقدار مشاهده شده برای نیروی کششی ابزار خاک‌ورز	(N)
y_p	مقدار پیش‌بینی شده برای نیروی کششی ابزار خاک‌ورز	(N)
A	ضریب ثابت معرف نوع ابزار	(10^{-3}N/m^2)
B	ضریب ثابت معرف نوع ابزار	(360N.s/m^2)
BD_d	جرم مخصوص ظاهری بر مبنای خاک خشک	(Mg/m^3)
BD_w	جرم مخصوص ظاهری بر مبنای خاک مرطوب	(Mg/m^3)
C	ضریب ثابت معرف نوع ابزار	(1296kg/m^3)
C	چسبندگی	(kN/m^2)
C_a	دگرچسبی	(kN/m^2)
D	نیروی کششی تئوری مورد نیاز ابزار خاک‌ورز	(N)
Error	مقدار خطا بین مقدار مشاهده شده و مقدار پیش‌بینی شده در مدل	(N)
ERMS	میانگین جذر مربعات خطا	(N)
F_i	ضریب معرف نیروی کششی ابزار خاک‌ورز در خاک‌های با بافت مختلف	—
MC	محتوای رطوبت خاک	(%)
MSE	میانگین مربعات خطا	(N^2)
MST	میانگین مربعات کل	(N^2)
N_q و N_{ca} ، dN_c ، dN_f	ثابت‌های وابسته به خصوصیات خاک و ابزار	—
P	نیروی مقاومت خاک	(kN)
R	ضریب همبستگی بین مقدار مشاهده شده و مقدار پیش‌بینی شده نیروی کششی	—
R^2	ضریب تعیین مدل پیش‌بینی کننده	—
R^2_{adj}	ضریب تعیین تعدیل شده	—
S	سرعت پیشروی ابزار خاک‌ورز	(km/h) یا (m/s)
SSE	مجموع مربعات خطا	(N^2)
SSP	مجموع مربعات مقادیر پیش‌بینی شده	(N^2)
SST	مجموع مربعات کل	(N^2)
T	عمق خاک‌ورزی	(cm)
V_t	حجم داخلی استوانه‌ای نمونه‌برداری	(cm^3)
W	عرض تیغه‌ی خاک‌ورز	(m)
W_1	مجموع وزن خاک دست‌نخورده، استوانه‌نمونه‌برداری و درپوش پلاستیکی	(g)
W_r	مجموع وزن خاک دست‌خورده‌ی مرطوب و ظرف اندازه‌گیری رطوبت	(g)
W_r	مجموع وزن خاک دست‌خورده‌ی خشک و ظرف اندازه‌گیری رطوبت	(g)
W_{d1}	مجموع وزن استوانه‌ای نمونه‌برداری و درپوش‌های پلاستیکی	(g)
W_{dt}	وزن ظرف اندازه‌گیری محتوای رطوبت	(g)
α	زاویه‌ی سطح افق با ابزار خاک‌ورز	(°)
ϵ	خطای نسبی	—
γ	جرم مخصوص ظاهری خاک	(kN/m^3)
δ	زاویه‌ی اصطکاک بین خاک و ابزار	(°)
χ^2	معیار مربع کای	(N^2)

نزدیک شدن ذرات جامد خاک به یکدیگر فشردگی نامیده می‌شود که در نتیجه آن فضای خالی بین آن‌ها محدود گشته و از رشد و توسعه ریشه گیاهان جلوگیری می‌نماید (هممت و آدامچوک^۱، ۲۰۰۸). از طرفی ادوات کشاورزی‌ای که با خاک در ارتباط هستند در خاک‌های فشرده به انرژی بیشتری نیاز دارند. این انرژی شدیداً به میزان فشردگی و محتوای رطوبت خاک وابسته است.

با توجه به این تعریف، فشردگی خاک را می‌توان به خوبی توسط جرم مخصوص ظاهری یا تخلخل خاک به طور کمی بیان نمود. اما روش‌های مستقیم اندازه‌گیری تخلخل و جرم مخصوص ظاهری مستلزم جدا کردن بخشی از خاک به صورت دست نخورده و انتقال آن به آزمایشگاه می‌باشد که لاجرم خطاهای زیادی را در اثر تغییر شکل خاک هنگام نمونه‌گیری در پی خواهد داشت، در ضمن تعیین فشردگی خاک به دلیل اینکه مستقل از عوامل دیگری چون بافت، ساختمان، محتوای رطوبت خاک و... است، معیار مناسبی برای تخمین میزان مخرب بودن آن به دست نمی‌دهد. بنابراین یافتن پارامتری که بتواند به خوبی بیانگر شرایط خاک از نظر فشردگی، بافت، ساختمان، رطوبت و... به طور همزمان باشد، ضروری به نظر می‌رسد.

بسیاری از محققان تعیین ضریب هدایت هیدرولیکی خاک در مزرعه به وسیله استوانه‌های مضاعف را به عنوان معیار مناسبی برای سنجش همزمان عوامل فوق معرفی کرده‌اند (هالورسون^۲ و همکاران^۳، ۲۰۰۳). اما این کار مستلزم صرف زمان زیادی بوده و نیاز به مهارت کافی و امکانات خاصی دارد. مقاومت مکانیکی خاک شاخص دیگری است که با روش‌های مختلف تعیین می‌شود و بررسی ارتباط آن با فشردگی خاک در میان محققان بسیار متداول است (میژل ریچارد^۴ و همکاران^۵، ۲۰۰۹). مقاومت کششی ادوات خاک‌ورز، می‌تواند معرف خوبی برای مقاومت مکانیکی خاک بوده و در نتیجه عامل مناسبی برای بیان شرایط خاک از نظر فشردگی نیز باشد (رپر و شواب^۶، ۲۰۰۹ و عباسپور گیلانده^۷، ۲۰۰۹). تعیین این پارامتر باید با دقت و مهارت زیاد و توسط تجهیزات و لوازم مخصوص صورت گیرد. در این تحقیق، ارتباط مقاومت کششی با جرم مخصوص ظاهری و محتوای رطوبت خاک در شرایط طبیعی مزرعه مورد بررسی قرار گرفته است.

اسکوت^۶ و کوتزباخ^۷ (۲۰۰۴) امکان در نظر گرفتن نیروی کششی یک ابزار خاک‌ورز را به عنوان یک منبع اطلاعات در مورد نوع خاک بررسی کردند. آنان در این تحقیق دریافتند که می‌توان از نیروی کششی ادوات خاک‌ورزی در شرایط یکسان رطوبتی برای تخمین درصد رس خاک استفاده کرد. کولی^۸ و همکاران (۲۰۰۳) اثر عبور یک ماشین برداشت چغندر را بر روی فشردگی خاک مطالعه کردند. آن‌ها اثرات مکانیکی اعمال شده را بر روی تخلخل خاک، جرم مخصوص ظاهری و درجه‌ی نفوذپذیری آب در یک خاک لومی شنی مورد بررسی قرار دادند.

¹ Hemmat & Adamchuk

² Halvorson

³ Miguel-Reichert

⁴ Raper & Schwab

⁵ Abbaspour-Gilandeh

⁶ Schutte

⁷ Kutzbach

⁸ Kulli

آنان دریافتند میزان جریان آب سطحی در اثر اعمال نیروهای مکانیکی به خاک، به وضوح افزایش می‌یابد. این نتایج با مقادیر جرم مخصوص ظاهری و تخلخل خاک نیز به خوبی همخوانی داشت. ریس^۱ (۱۹۶۵)، به نقل از مک‌کایز^۲ (۱۹۸۵)، برای تعیین نیروی مورد نیاز کشش تیغه‌های باریک برش دهنده‌ی خاک رابطه‌ی زیر را پیشنهاد کرده است:

$$P = (\gamma d^2 N_\gamma + CdN_c + C_a dN_{ca} + qdN_q)W \quad (1)$$

از این رابطه تحت عنوان معادله‌ی عمومی کشش تیغه‌های باریک برش دهنده‌ی خاک یاد می‌کنند. در معادله‌ی عمومی تیغه‌های باریک برش دهنده‌ی خاک، از اثر سرعت پیشروی تیغه بر روی مقاومت خاک چشم پوشی شده است، اما اثر محتوای رطوبت خاک، بافت، ساختمان و... به طور غیر مستقیم توسط مشخصات مکانیکی خاک بیان شده است.

در اطلاعات منتشر شده از سوی انجمن مهندسی کشاورزی امریکا^۳ در مورد مدیریت ماشین‌های کشاورزی (ASAE, ۲۰۰۳) D497.4 رابطه‌ی (۲) برای نیروی لازم جهت کشیدن ادوات برش دهنده‌ی خاک پیشنهاد شده است:

$$D = F_i [A + B(S) + C(S)^2] WT \quad (2)$$

در این رابطه اثر محتوای رطوبت، جرم مخصوص ظاهری، ساختمان خاک و... نادیده گرفته شده است، بنابراین رابطه‌ی (۲) یک رابطه‌ی تخمینی برای نیروی کششی مورد نیاز ابزار خاک‌ورز است. جیرون^۴ و همکاران (۲۰۰۴) اثر فشردگی خاک و محتوای رطوبت آن را بر روی نیروی کششی سه نوع شیار باز کن عمیق کارهای رایج در اسپانیا مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌های آنان در یک مخزن خاک آزمایشگاهی که با خاک لومی پر شده بود انجام گرفت. این سه شیار باز کن توسط یک جک هیدرولیکی با سرعت 40 mm/s در خاک حرکت داده می‌شدند و نیروی اعمال شده از سوی خاک بر روی آن‌ها توسط یک لودسل L شکل اندازه‌گیری می‌شد. در آزمایش‌ها پنج سطح محتوای رطوبت، چهار سطح جرم مخصوص ظاهری و دو عمق کاری مورد بررسی قرار گرفتند. با افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک و محتوای رطوبت آن میزان نیروی کششی لازم برای هر سه شیار باز کن به طور معنی داری افزایش می‌یافت.

با فرض یکسان بودن تقریبی شرایط خاک از نظر بافت، ساختمان، درصد مواد آلی و... در یک مزرعه، عمده‌ترین عواملی که در تغییر مقاومت مکانیکی خاک دخالت دارند، محتوای رطوبت و جرم مخصوص ظاهری خاک هستند که دستخوش تغییرات زیادی در بستر زمان می‌شوند. در تحقیقات ذکر شده معمولاً تأثیر این دو عامل بر روی مقاومت مکانیکی خاک در شرایط کنترل شده‌ی آزمایشگاهی و به منظور تعیین ابزار خاک‌ورزی که در مصرف انرژی بهینه است بررسی شده است. در مورد تحقیقاتی هم که اثر این دو عامل در مزرعه بررسی شده، یک مدل یا رابطه‌ی ریاضی که بتواند این ارتباط را به صورت کمی بیان کرده و معیار مناسبی به دست بدهد ارائه نشده

¹ Reece

² McKyes

³ American Society of Agricultural Engineering

⁴ Giron

است. در ضمن شرایط این گونه آزمایش‌ها منطبق با شرایط غالب موجود در کشور نبوده و نمی‌توان از نتایج آنها به خوبی بهره جست. بنابراین اجرای تحقیقاتی کامل و بومی در این زمینه ضروری به نظر می‌رسید.

مواد و روش‌ها

اندازه‌گیری مقاومت کششی خاک

اندازه مقاومت کششی به شرایط خاک و خصوصیات ابزار خاک‌ورز وابسته است. بنابراین در صورتی می‌توان این پارامتر را معیاری برای بیان شرایط خاک دانست که اثرات خصوصیات ابزار خاک‌ورز از آن حذف شده باشد. به عبارت دیگر می‌بایست در تمامی مراحل آزمایش، نوع، جنس، ابعاد، روش استقرار و سرعت پیشروی ابزار خاک‌ورز ثابت باشد. از آنجا که استانداردهای خاصی برای موارد فوق تدوین نشده است، در این تحقیق برای تعیین مقاومت مکانیکی خاک از یک تیغه فولادی ساده‌ی مستطیلی به عرض ۵ سانتی‌متر، زاویه‌ی استقرار ۶۰ درجه نسبت به افق با عمق کار ۱۰ سانتی‌متر استفاده شد. ضخامت تیغه ۵ میلی‌متر و نوک آن در محل برش خاک با زاویه‌ی ۶۰ درجه تیز شده بود.

با توجه به لزوم اندازه‌گیری دقیق مقاومت کششی، حتی‌الامکان سعی شد تا سرعت پیشروی تیغه ثابت باشد. بدین منظور یک دستگاه پشت تراکتوری طراحی و ساخته شد که حرکت تیغه را از یک سیلندر هیدرولیکی تأمین می‌کرد (شکل ۱). برای جلوگیری از تغییرات سرعت و اعمال ارتعاشات ناشی از حرکت تراکتور، این دستگاه طوری طراحی شد که هنگام اندازه‌گیری مقاومت کششی خاک، تراکتور در حالت سکون باشد. حداکثر سرعت پیشروی تیغه در این دستگاه ۱۵۰ میلی‌متر بر ثانیه است تا از ضربه زدن به خاک و ایجاد نوسان در داده‌های مقاومت کششی خاک تا جای ممکن جلوگیری شود.



شکل ۱- تصویر دستگاه طراحی و ساخته شده برای اندازه‌گیری دقیق مقاومت کششی ابزار خاک‌ورز
این دستگاه، ابزار خاک‌ورز مورد آزمایش را در یک مسیر ۱۰۸ سانتی‌متری حرکت می‌دهد و طی آن ۶۵ داده‌ی مربوط به نیروی کششی ابزار خاک‌ورز را در فواصل یکسان ۱۶/۵ میلی‌متری ذخیره می‌کند. این داده‌ها توسط یک لودسل هشت وجهی که پشت تیغه قرار گرفته است تولید می‌شود.
در این تحقیق، تیغه با سرعت ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه حرکت داده شد و در هر آزمایش، چندین داده از داده‌های مقاومت کششی مربوط به ابتدا و انتهای مسیر پیشروی تیغه حذف گردید و داده‌های باقیمانده‌ی میانی، به عنوان مقاومت کششی خاک در نظر گرفته شد تا اثرات تغییر سرعت و سایر ناپیکنواختی‌های حرکت تیغه در محاسبه‌ی مقاومت کششی به حداقل برسد.

اندازه گیری جرم مخصوص ظاهری

برای اندازه گیری جرم مخصوص ظاهری خاک بر مبنای خشک، از استوانه‌های نمونه گیر به قطر ۶۲ و ارتفاع ۳۸ میلی‌متر استفاده شد. بنابراین حجم این استوانه‌ها $V_t = 115 \text{ cm}^3$ می‌باشد. پس از انتقال نمونه‌ی دست نخورده به آزمایشگاه، وزن نمونه‌ی خاک به همراه استوانه و درپوش‌های پلاستیکی آن (W_1) به دقت اندازه گیری می‌شود. سپس درپوش‌های پلاستیکی برداشته می‌شوند و خاک درون استوانه در یک ظرف دیگر که وزن آن قبلاً اندازه گیری شده (W_{d2}) تخلیه می‌گردد. پس از اندازه‌گیری وزن مجموعه‌ی استوانه‌ی نمونه برداری و درپوش‌های پلاستیکی (W_{d1}) می‌توان جرم مخصوص ظاهری خاک بر مبنای خاک مرطوب را از رابطه‌ی (۳) تعیین کرد:

$$BD_w = \frac{\text{وزن خاک دست نخورده‌ی مرطوب}}{\text{حجم استوانه‌ی نمونه برداری}} = \frac{W_1 - W_{d1}}{V_t} \quad (3)$$

در صورتی که محتوای رطوبت وزنی خاک در دسترس باشد، می‌توان جرم مخصوص ظاهری خاک بر مبنای خشک را با استفاده از رابطه‌ی (۴) محاسبه نمود:

$$BD_d = \frac{BD_w}{MC\% + 1} \quad (4)$$

اندازه گیری محتوای رطوبت وزنی خاک

اندازه‌گیری محتوای رطوبت وزنی خاک با نمونه‌ای که برای تعیین جرم مخصوص ظاهری گرفته شده میسر می‌باشد. پس از اینکه خاک داخل استوانه‌ی نمونه‌برداری در ظرف دیگری به وزن W_{d2} ریخته شد، وزن مجموع این ظرف و خاک ریخته شده در آن (W_2) تعیین شده و در آن با حرارت 105° سلسیوس قرار داده می‌شود. پس از مدت ۲۴ ساعت این ظرف مجدداً به همراه محتویات آن که رطوبت خود را از دست داده است توزین می‌گردد (W_3). محتوای رطوبت وزنی خاک مورد آزمایش از رابطه‌ی (۵) به دست می‌آید:

$$MC = \frac{\text{وزن خاک خشک}}{\text{وزن رطوبت} \times 100} = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_{d2}} \times 100 \quad (5)$$

روش استخراج و ارزیابی مدل

آزمایشات در قطعه زمینی به ابعاد 8×50 مترمربع در دانشکده‌ی مهندسی و فناوری کشاورزی دانشگاه تهران واقع در کرج صورت گرفت که بافت خاک آن لومی رسی با ۲۸٪ رس و ۴۲٪ سیلت بود^۱. به منظور استخراج مدل پیش‌بینی نیروی کششی نسبت به دو متغیر فیزیکی خاک (جرم مخصوص ظاهری و محتوای رطوبت آن) از تحلیل رگرسیون چند متغیره^۲ در نرم افزار متلب^۳ استفاده شد. تغییر محتوای رطوبت خاک، در مزرعه مورد آزمایش با آبیاری زمین و انجام دوره‌ای آزمایشات، با گذشتن زمان و از دست رفتن رطوبت در فصل تابستان صورت گرفت. جرم مخصوص ظاهری متغیر خاک نیز با انجام آزمایش‌ها در زمین شخم‌خورده (به عنوان خاک پوک^۴) و متراکم کردن تدریجی آن با تردد تراکتور از روی زمین ایجاد گردید. لازم به ذکر است عبور تراکتور و ماشین‌های سنگین در

^۱ طبق گزارش آزمایشگاه خاک‌شناسی دانشکده‌ی مهندسی و فناوری کشاورزی دانشگاه تهران

^۲ Multiple linear regressions analysis

^۳ Matlab

^۴ loose

مرتب اول، تغییر بیشتری در جرم مخصوص ظاهری خاک ایجاد می‌کند ولی تردهای بعدی آن‌ها چندان سبب فشردگی بیشتر خاک نخواهد شد، به همین دلیل دامنه تغییرات جرم مخصوص ظاهری در آزمایش‌های مربوط به این تحقیق چندان گسترده نبود. قبل از برآزش منحنی‌های مورد نظر، آنالیز همبستگی روی داده‌ها صورت گرفت تا اهمیت متغیرهای مستقل (MC و BD) روی متغیر وابسته (D) مشخص شود. بدیهی است در صورتی که تفاوت معنی‌داری در سطح تأثیر دو متغیر مستقل فوق بر روی مقاومت کششی ابزار خاک‌ورز مشاهده شود، مدل پیشنهادی، بیشتر متأثر از متغیری خواهد بود که با سطح احتمال بیشتری با متغیر وابسته در ارتباط است.

انتخاب نوع مدل با آزمون فرم‌های مختلف معادلات ریاضی، از جمله: توابع چندجمله‌ای، لگاریتمی، نمایی، سینوسی و ... از طریق آنالیز رگرسیون دو متغیره صورت گرفت. پس از انتخاب نوع تابع، برای تعیین بهترین مدل از شش معیار مختلف استفاده گردید، که عبارتند از: ضریب تعیین^۱ (R^2)، ضریب همبستگی^۲ (R)، ضریب تعیین تعدیل شده^۳ (R^2_{adj})، معیار مربع کای^۴ (χ^2)، خطای نسبی^۵ (ε) و میانگین جذر مربعات خطا^۶ (ERMS). در روابط (۹) تا (۱۴) معادلات تعیین هر یک از این شش معیار آورده شده است. بدیهی است هرچه میزان سه معیار اول، بیشتر و مقدار سه معیار بعدی کمتر باشد، دقت مدل بیشتر خواهد بود.

$$Error = y_p - y_o \quad (6)$$

$$SST = \sum (y_o - \bar{y}_o)^2, \quad SSP = \sum (y_p - \bar{y}_p)^2, \quad SSE = \sum Error^2 \quad (7)$$

$$MST = \frac{SST}{n-1}, \quad MSE = \frac{SSE}{n-p-1} \quad (8)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (9)$$

$$R = \frac{\sum (y_o - \bar{y}_o)(y_p - \bar{y}_p)}{\sqrt{SST \times SSP}} \quad (10)$$

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{MSE}{MST} \quad (11)$$

$$\chi^2 = \frac{SSE}{n-p} \quad (12)$$

$$\varepsilon = \frac{100}{n} \times \sum \left| \frac{Error}{y_o} \right| \quad (13)$$

$$ERMS = \sqrt{\frac{SSE}{n}} \quad (14)$$

¹ Coefficient of determination

² Correlation coefficient

³ Adjusted coefficient of determination

⁴ Chi-square

⁵ Related error

⁶ Root mean of square errors

برای سهولت در تصمیم‌گیری برای تعیین مدل بهینه، معیارهای مذکور در مورد هر مدل، نسبت به حداکثر مقادیر بدست آمده آن معیار، نرمال شده است تا به اعدادی قابل مقایسه و کوچکتر از یک تبدیل شوند.

نتایج و بحث

نتایج آنالیز رگرسیون دومتغیره نشان داد بهترین روش پیش‌بینی مقاومت کششی بر اساس دو متغیر جرم مخصوص ظاهری و محتوای رطوبت، استفاده از مدل چندجمله‌ای می‌باشد. با توجه به جدول (۱)، محتوای رطوبت خاک در سطح بسیار معنی‌داری (کمتر از ۰.۱٪) روی مقاومت کششی ابزار خاک‌ورز تأثیر داشت و جرم مخصوص ظاهری تأثیر معنی‌داری روی مقاومت کششی ابزار نداشت، مرتبه‌های مختلف محتوای رطوبت خاک در مدل‌سازی مقاومت کششی ابزار مدنظر قرار گرفت.

جدول ۱- مقادیر سطح معنی‌داری متغیرهای مستقل

متغیر مستقل	سطح معنی‌داری ^۱
محتوای رطوبت (MC)	$1/75 \times 10^{-6}$
جرم مخصوص ظاهری (BD)	$399327/87 \times 10^{-6}$

در تحلیل همبستگی بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته، ماتریس ضرایب همبستگی به صورت زیر استخراج شد:

$$r = \begin{bmatrix} 1 & -0.22 & 0.63 \\ -0.22 & 1 & 0.12 \\ 0.63 & 0.12 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

سطرها و ستون‌های این ماتریس به ترتیب مربوط به محتوای رطوبت، جرم مخصوص ظاهری و مقاومت کششی ابزار می‌باشند. مثبت بودن ضریب همبستگی بین دو متغیر نشانگر برقراری رابطه مستقیم بین متغیرهاست به طوری که افزایش یکی، افزایش دیگری را ناشی می‌شود. هرچه این اندازه به یک نزدیکتر و از صفر دورتر باشد مقدار همبستگی بین دو متغیر بیشتر خواهد بود. مقدار کم ضریب همبستگی بین جرم مخصوص ظاهری و مقاومت کششی، حاکی از این امر است که همبستگی بین این دو کم است که نتایج بخش قبل نیز مؤید این مطلب است. مثبت بودن ضریب همبستگی بین دو متغیر مستقل و متغیر وابسته نشان داد که با افزایش محتوای رطوبت یا جرم مخصوص ظاهری، مقاومت کششی افزایش خواهد یافت.^۲

سپس برای برآزش بهترین نوع مدل چندجمله‌ای، روی داده‌ها تحلیل رگرسیون خطی چند متغیره با در نظر گرفتن محتوای رطوبت و جرم مخصوص ظاهری به عنوان متغیرهای مستقل و مقاومت کششی به عنوان متغیر

^۱ P-value

^۲ در این پژوهش، آزمایشات به گونه‌ای رقم خورده بود، که تصادفاً رابطه بین محتوای رطوبت و جرم مخصوص ظاهری تقریباً معکوس بود، که در رابطه (۱۵) به چشم می‌خورد.

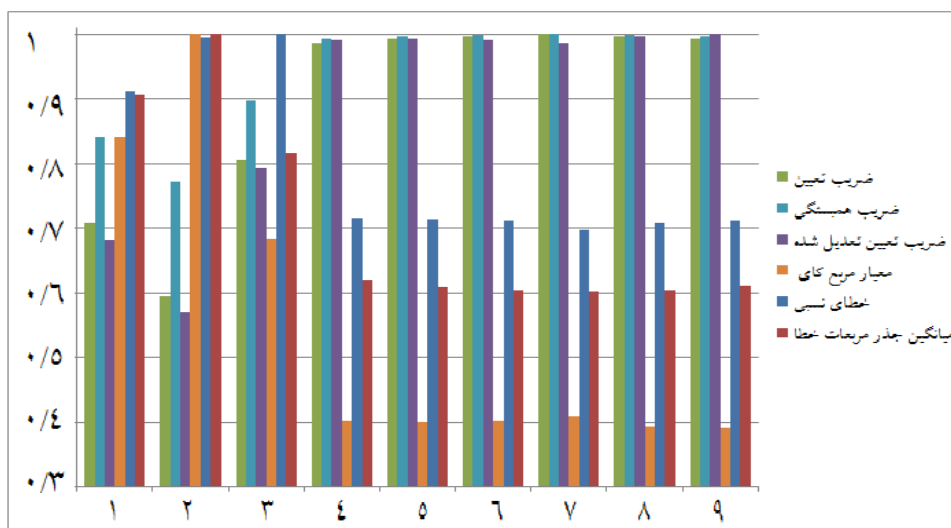
وابسته صورت گرفت و ضرایب هر مدل استخراج شد. ضرایب مدل‌های ارائه شده در جدول (۲) مشاهده می‌شوند که این ضرایب با قرار گرفتن در رابطه (۱۶) توانایی مدل‌سازی مقاومت کششی برحسب محتوای رطوبت و جرم مخصوص ظاهری را دارند.

$$D = a \times MC^1 + b \times MC^0 + c \times MC^2 + d \times MC^3 + e \times MC^4 + f \times MC + g + h \times BD + i \times BD \times MC \quad (16)$$

جدول ۲- ضرایب مدل‌های پیشنهاد شده برای پیش‌بینی مقدار نیروی کششی ابزار خاک‌ورز بر اساس متغیرهای محتوای رطوبت و جرم مخصوص ظاهری

i	h	g	f	e	d	c	b	a
۲۳/۷۴	-۱۰۱/۶۲	۱۵۵/۹۷	-۳۲/۲۱	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۷۶/۹۱	-۱۰۷/۵۷	۲/۷۸	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۷/۹	۱۳/۹۷	-۴/۴	۰/۴۱	۰	۰	۰	۰
۰	-۱/۴۴	-۰/۷۶	-۱۱/۰۶	-۱/۷	۰/۰۸	۰	۰	۰
۰	۵/۲۱	-۰/۳۱	۳/۲۲	۰/۰۱	-۰/۰۷۳	۰/۰۰۴	۰	۰
۰	۴/۶۲	۱۳/۳۵	-۸/۸۳	۳/۸۸	-۰/۵۸	۰/۰۳۵	-۰/۰۰۰۷	۰
۰	۵/۷	-۶/۳۲	۱۲/۳۸	-۵	۱/۱۴	-۰/۱۳	۰/۰۰۷	-۰/۰۰۰۱
۰	۰	۲۰/۰۰۹۷	-۸/۶۳۳۵	۳/۸۲۷۴	-۰/۵۸۱۱	۰/۰۳۴۹	-۰/۰۰۰۷	۰
۰	۰	۳/۵۴۲۴	۰/۰۰۴۱	-۰/۰۶۴۸	۰/۰۰۰۴	۷/۰۹۴۷	۰	۰

شکل (۲) مقادیر شش معیار نرمال شده برای مدل‌های مختلف پیشنهاد شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲- مقادیر نرمال شده شش معیار ارزیابی برای نه مدل پیش‌بینی کننده نیروی کششی

در شکل (۳) نمودار ضریب تعیین، که معیار مهمی برای ارزیابی صحت و دقت مدل‌های پیشنهادی است، در مورد هر یک از مدل‌های پیشنهادی آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش مرتبه چندجمله‌ای دقت مدل برازش شده افزایش می‌یابد.



شکل ۳- ضریب تعیین هر یک از نه مدل پیشنهاد شده برای تخمین نیروی کششی ابزار خاک‌ورز

البته بایستی توجه داشت که میزان پیچیدگی و داشتن پارامترهای زیاد یک مدل از مقبولیت آن می‌کاهد. بنابراین، در این پژوهش معیار ضریب تعیین تعدیل شده و ضریب مربع کای، به عنوان معیارهایی که در معادلات خود (روابط (۱۱) و (۱۲)) تعداد پارامترهای مدل را نیز مدنظر قرار می‌دهند، برای انتخاب مدل بهینه انتخاب شدند.



شکل ۴- ضریب تعیین تعدیل شده هر یک از نه مدل پیشنهاد شده برای تخمین نیروی کششی ابزار خاک‌ورز

در شکل (۴)، روند تغییرات ضریب تعیین تعدیل شده مدل‌ها دیده می‌شود. به ترتیب مدل‌های ۹ و ۸ دارای بیشترین مقدار برای این معیار بودند. بنابراین مدل ۹ با رابطه (۱۷) به عنوان مدل بهینه انتخاب شد. البته به ترتیب مدل‌های ۹ و ۸ دارای کمترین مقدار ضریب مربع کای بودند که انتخاب مدل ۹ را به مدل بهینه تایید می‌کند.

$$D = 7/0947MC^4 + 0/004MC^3 - 0/0648MC^2 + 0/0041MC + 3/5424 \quad (17)$$

در مدل‌های ۹ و ۸ با آن که BD حذف شده است مدل از دقت بالایی برخوردار است که خود صحه‌ای بر مطالب قبلی است که جرم مخصوص ظاهری روی مقاومت کششی ابزار تاثیر چندانی ندارد و حتی با حذف آن به خوبی باز هم می‌توان مقاومت کششی ابزار را پیش‌بینی نمود. باید توجه داشت که محتوای رطوبت در آزمایش‌ها

بین ۱/۵-۱۷/۶۳ درصد و جرم مخصوص ظاهری بر مبنای خشک خاک، بین ۱/۲۹-۱/۵۵ (Mg/m^3) تغییر کرده بود و استفاده از رابطه پیشنهاد شده، خارج از محدوده‌های مذکور (برون‌یابی) نتایج منطقی در بر نخواهد داشت. احتمالاً به دلیل محدود بودن دامنه تغییرات جرم مخصوص ظاهری در این تحقیق امکان حذف این متغیر از مدل پیشنهادی میسر گردید و پیش‌بینی می‌شود با انجام آزمایش‌ها در دامنه گسترده‌تری از جرم مخصوص ظاهری مدل‌هایی که شامل این متغیر بودند، توانایی بیشتری در پیش‌بینی رفتار نیروی کششی ابزار خاک‌ورز داشتند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور تعیین فشردگی خاک به عنوان معیاری برای تخمین رشد و توسعه ریشه و نیروی مورد نیاز ادوات خاک‌ورز از اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک استفاده گردید و مقاومت کششی یک تیغه خاک‌ورز معیار سنجش مقاومت مکانیکی در نظر گرفته شد. از آنجا که اندازه‌گیری نیروی کششی ادوات خاک‌ورز مستلزم به-کارگیری تجهیزات خاصی است، اقدام به تعیین رفتار آن در برابر تغییرات جرم مخصوص ظاهری خاک و محتوای رطوبت آن به عنوان عوامل فیزیکی خاک - که اندازه‌گیری آنها نیاز به تجهیزات پیشرفته ندارد - گردید. در پیش‌بینی این رفتار مدل‌های مختلفی روی داده‌های حاصل از آزمایشات برآزش گردید و در نهایت با توجه به بیشترین ضریب تعیین تعدیل شده، مدل چندجمله‌ای از مرتبه چهار بر حسب محتوای رطوبت برگزیده شد. این مدل با دقت خوبی توانست مقدار نیروی مقاومت کششی را پیش‌بینی نماید. در این تحقیق چهار نکته مؤید این بود که جرم مخصوص ظاهری روی نیروی مقاومت کششی تأثیر چندانی ندارد:

- ۱- عدم معنی‌داری ارتباط بین جرم مخصوص ظاهری و نیروی مقاومت کششی
- ۲- کم بودن ضریب همبستگی بین جرم مخصوص ظاهری و نیروی مقاومت کششی
- ۳- بالا بودن معیارهای انتخاب مدل پیشگو در مدل‌های فاقد جرم مخصوص ظاهری
- ۴- کم بودن دامنه تغییرات جرم مخصوص ظاهری در آزمایش‌ها

منابع

1. Abbaspour-Gilandeh Y. 2009. On-the-go soil mechanical strength measurement at different soil depths. *Journal of Food, Agriculture & Environment*. 7(3,4):696-699.
2. ASAE Standards. 2003. D497.4: Agricultural machinery management data. St. Joseph, Mich.: ASAE.
3. Giron V.S., J.J. Rami' rez, J.J. Litago and J.L. Hernanz. 2004. Effect of soil compaction and water content on the resulting forces acting on three seed drill furrow openers. *Soil and Tillage Research*, 74(1):78-87.
4. Halvorson J. J., L. W. Gatto and D. K. McCool- 2003- Overwinter changes to near-surface bulk density, penetration resistance and infiltration rates in compacted soil- *Journal of Terramechanics*, 40(1):1-24.
5. Hemmat A. and V.I. Adamchuk. 2008. Sensor systems for measuring soil compaction: Review and analysis. *Computers and electronics in agriculture* 63:89-103.
6. Kulli B., M. Gysi and H. Flüher. 2003. Visualizing soil compaction based on flow pattern analysis - *Soil and Tillage Research*, 70(1): 29-40.

7. McKyes E. 1985. Soil Cutting and Tillage. Elsevier Science Publishers.
8. Miguel Reichert J., L.E.A.S. Suzuki, D.J. Reinert, R. Horn, I.H. kansson. 2009. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil & Tillage Research*, 102:242–254.
9. Raper R.L., E.B. Schwab. 2009. Development of an in-row subsoiler attachment to reduce smearing. *Applied Engineering in Agriculture*. 25(4): 495-503.
10. Schutte B. and H. D. Kutzbach. 2004. Tillage draught force as information source for soil variability – AGENG Conference – 404-429.

An optimum model development for prediction of a tillage tool draft resistance based on soil moisture content and dry bulk density

Soil compaction is an important factor in reducing crop yields, increasing agricultural machineries required energy, increasing environmental pollution and many other detrimental factors. Soil compaction can be defined as a denser state of soil particles and increased bulk density or reduced porosity. Direct methods in measuring soil porosity or bulk density require disturb soil samples and displacing them to laboratory where large errors are encountered due to soil deformation. Besides, other factors such as moisture content and soil structure are omitted. In this study, the effect of soil bulk density and moisture content as independent variables on the draft resistance of a clay loam soil was studied. The study was carried out not only in order to determine the behavior of the mentioned factors against variations of the independent variables, but also to develop a mathematical model between them. To determine draft resistance a mounted devise equipped with a data logger was designed and constructed and was used after required evaluations. The draft resistance was determined using a load cell attached behind a simple rectangular tine with a width of 5cm and an aspect ratio of 2.4 and a rake angle of 60°.

The results showed that draft resistance had a stronger relationship to the moisture content where its value significantly increased with increase in moisture content. Also, in order to predict the draft resistance of the soil, several mathematical models were developed comparing in the basis of these parameters: Number of constants, number of variables, complexity of the model, correlation coefficient, chi-square and adjusted R-square. Finally, a fourth order multinomial model with five constants having R-square of 0.81 and adjusted R-square of 0.78 were selected.

Keywords: Soil moisture content, Bulk density, Draft resistance, Mathematical modeling.