



ارزیابی تعدادی از مدل‌های مقاومت فروری خاک در برخی از کشت و صنعت‌های نیشکر استان خوزستان

* فرزاد مرادی^۱، بیژن خلیلی مقدم^۲، سیروس جعفری^۳ و شجاع قربانی دشتکی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان، آستادیار گروه علوم

خاک، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان، ^۲ دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه شهرکرد

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۰/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۴/۱۷

چکیده

توابعی که به درستی مقاومت فروری را به ویژگی‌های دیگر خاک مرتبط می‌کنند، ابزارهای کارآمدی در تشخیص پراکندگی مقاومت مکانیکی خاک محسوب می‌شوند به‌ویژه هنگامی که تغییرات مکانی و زمانی پارامتر بالا به آسانی قابل اندازه‌گیری نباشد. اهمیت این پدیده پژوهشگران را بر آن داشته تا همواره در پی ارایه مدلی مناسب برای بیان کمی مقاومت فروری باشند. در این پژوهش، عملکرد دوازده مدل در برآورد مقاومت فروری در دو عمق ۴۰- و ۸۰-۴۰ سانتی‌متری مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، داده‌های به‌دست آمده از آزمایش‌های فرسایشی با استفاده از فرسایش دیجیتال در ۱۵۰ نقطه از کشت و صنعت‌های مختلف نیشکر در استان خوزستان جمع‌آوری گردید. پارامترهای مدل‌های یاد شده به روش حداقل مجموع مربعات خطا تعیین گردید. به‌منظور بررسی صحت عملکرد مدل‌های مورد بررسی در برآورد مقاومت فروری، از آماره‌های میانگین خطا (ME)، میانگین قدرمطلق میانگین خطاها (MAME)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی پیرسون (r) استفاده شد. مقایسه عملکرد مدل‌ها با یکدیگر نشان داد که تمامی مدل‌های رگرسیونی بر پایه محتوی رطوبتی و چگالی ظاهری، از خطای کم‌تر و ضریب همبستگی بالاتری در برآورد مقاومت فروری برخوردار بودند. به‌علاوه مدل ارایه شده توسط تو و کی بر مبنای مکش ماتریک و دکستر و همکاران بر مبنای شیب منحنی نگهداشت رطوبتی در نقطه عطف و تنش مؤثر بالاترین مقدار خطا و کم‌ترین ضریب همبستگی را شامل بودند. به‌طورکلی، با توجه به مقادیر مثبت میانگین MEها، تمامی مدل‌های مورد ارزیابی بیش برآوردگر بودند.

واژه‌های کلیدی: مدل، مقاومت فروری خاک، کشت و صنعت‌های نیشکر

* مسئول مکاتبه: farzadmp2@yahoo.com

مقدمه

کشت و کار مکانیزه نیشکر در استان خوزستان با آب و هوای گرم و خاک عمیق و حاصلخیز با قدمتی بیش از ۵۰ سال در حال انجام است. با وجود اهمیتی که این گیاه در کشور دارد ولی کشت و زرع آن با معضلاتی روبروست که از آن جمله می‌توان به افزایش تراکم و مقاومت فروروی خاک اشاره کرد. این پدیده معمولاً باعث کاهش جذب عناصر غذایی، کمبود اکسیژن، کاهش رشد و تغییر شکل ریشه می‌گردد (راپر، ۲۰۰۵). مقاومت فروروی یک روش آسان و سریع برای اندازه‌گیری استحکام خاک می‌باشد، به همین دلیل برای پی بردن به وضعیت تراکم خاک به‌طور گسترده‌ای از این شاخص استفاده شده است که به‌وسیله فروسنج اندازه‌گیری می‌شود (بنگوق و همکاران، ۲۰۰۱). اگر چه به‌طور کلی حد بحرانی مقاومت فروروی را ۲ مگاپاسکال در نظر می‌گیرند اما مقدار بالا برای گیاهان مختلف متفاوت است. به‌علاوه حد بحرانی مقاومت فروروی بسته به بافت و رطوبت خاک نیز متفاوت خواهد بود (تایلور و برار، ۱۹۹۱). نتایج پژوهش‌های لرزاده و همکاران (۲۰۰۲) نیز نشان داد که تراکم خاک تا مقاومت فروروی ۱/۲۵ مگاپاسکال هیچ‌گونه اثر معنی‌داری بر عملکرد کمی و کیفی نیشکر ندارد. مترچرا و همکاران (۱۹۹۱) نشان دادند که مقاومت فروروی بالاتر از ۳/۶ مگاپاسکال به‌طور کامل رشد ریشه را متوقف می‌کند.

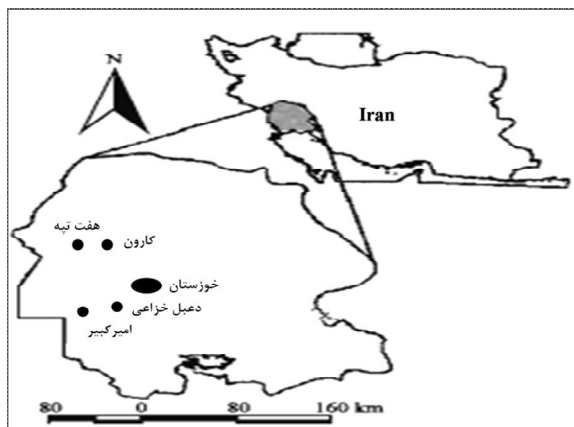
اهمیت این پدیده سبب گردیده است، مدل‌های زیادی به‌منظور برآورد آن ارایه گردد. از آن‌جا که فرضیه‌ها و پارامترهای به‌کار رفته در این مدل‌ها با هم متفاوت است، انتظار می‌رود در یک شرایط معین، مدلی خاص عملکرد بهتری در مقایسه با بقیه داشته باشد. پارامترهای مؤثر بر مقاومت فروروی شامل درصد رطوبت، چگالی ظاهری، کربن آلی، آهک، بافت، اعمال فشار و تعداد عبور و مرور از طریق وسایل نقلیه می‌باشند. از این‌رو پژوهش‌های زیادی در زمینه اثر این پارامترها بر مقاومت فروروی برای رسیدن به مدلی با کم‌ترین پارامتر و بیش‌ترین کارایی انجام شده است. تو و کی (۲۰۰۵) همبستگی بین مقاومت فروروی و درصد رطوبت را به نوع و ساختمان خاک و لاپن و همکاران (۲۰۰۴) این همبستگی را به نوع مدیریت مرتبط دانستند. دکستر و همکاران (۲۰۰۷)، براساس اطلاعات موجود در منطقه‌ای از لهستان معادله‌ای براساس تنش مؤثر و شیب منحنی نگهداشت رطوبتی برای برآورد مقاومت فروروی ارایه کردند. اسمیت و همکاران (۱۹۹۷) مطالعات آزمایشگاهی و صحرایی جامعی را با اندازه‌گیری مقاومت فروروی در ۲۹ خاک در آفریقای جنوبی با دامنه وسیعی از

بافت، محتوی رطوبتی و چگالی ظاهری، مدیریت کردند. نتایج پژوهش‌های این پژوهشگران نشان داد که در مقادیر رطوبتی گنجایش زراعی و بالاتر با وجود دامنه گسترده چگالی ظاهری، مقاومت فروری تغییرات اندکی داشت حال آن‌که بیش‌ترین اختلاف در مقاومت فروری در مقادیر رطوبتی پایین رخ داد.

در حال حاضر، تراکم خاک از جمله معضلاتی است که کشت و صنعت‌های نیشکر استان خوزستان با آن روبرو هستند، بنابراین مدل‌سازی مقاومت فروری برای مدیریت بهینه تراکم ضروری می‌باشد. از آن‌جا که دامنه استفاده از هر مدل مقاومت فروری به ویژگی‌های متفاوت خاک در منطقه بسط داده شده وابسته است، بنابراین استفاده از این مدل‌ها در کشت و صنعت‌های مورد بررسی نیازمند ارزیابی آن‌ها در شرایط خاص این منطقه می‌باشد. از این‌رو، هدف از این مطالعه ارزیابی و مقایسه کارایی برخی از مدل‌های موجود در منابع در برآورد مقاومت فروری خاک در کشت و صنعت‌های نیشکر استان خوزستان بود.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه و شیوه نمونه‌برداری: محدوده مورد مطالعه این پژوهش، چهار کشت و صنعت دعبل خزاعی، امیرکبیر، کارون و هفت‌تپه در استان خوزستان واقع در جنوب‌غربی ایران می‌باشد (شکل ۱). میانگین ارتفاع از سطح دریا ۸۲-۴۲ متر و متوسط بارندگی سالیانه ۲۳۳ میلی‌متر است که بیش‌تر در ماه‌های آذر، دی و بهمن نازل می‌گردد. گرم‌ترین ماه سال تیرماه با حداکثر مطلق ۵۴ درجه سانتی‌گراد و سردترین ماه سال بهمن‌ماه با حداقل ۳- درجه سانتی‌گراد و متوسط نم نسبی سالانه ۵۵/۵ درصد می‌باشد. خاک‌های مورد مطالعه در گروه بزرگ Calcic Haploustepts قرار دارند و نوع کشت غالب نیز، نیشکر می‌باشد. در این کشت و صنعت‌ها براساس تعداد سال‌های کشت، مواد آلی، بافت و هدایت الکتریکی مزارعی برای نمونه‌برداری به‌طور تصادفی نظارت شده انتخاب گردید و تعداد ۳۱۰ نمونه خاک از دو عمق ۰-۴۰ و ۴۰-۸۰ سانتی‌متری پروفیل، جمع‌آوری شد. سابقه کشت نیشکر در اراضی مورد نمونه‌برداری در ۴ کشت و صنعت بالا به‌ترتیب ۵، ۱۵، ۴۰ و ۵۰ سال می‌باشد که به‌صورت تناوب زراعی با گندم، جو و ذرت همراه است.



شکل ۱- موقعیت چهار کشت و صنعت مورد مطالعه در استان خوزستان.

مدل‌های مورد ارزیابی و ویژگی‌های اندازه‌گیری شده: تعداد ۱۲ مدل برآوردکننده مقاومت فروری، از بین مدل‌های موجود، با توجه به کارایی مناسب آن‌ها در دیگر مناطق مشابه انتخاب شد و برای به‌دست آوردن داده‌های ورودی مدل‌های بالا، نمونه‌برداری صورت گرفت. مدل‌های نام‌برده در جدول ۱ آورده شده‌اند.

جدول ۱- مدل‌های برآوردکننده مقاومت فروری موجود در منابع.

شماره	مدل	پارامتر	معادله
۱	Jakobsen and Dexter (1987)	a, b, c	$PR = \exp(a + b\rho_b + c\theta_v)$
۲	Jakobsen and Dexter (1987)	a, b, c	$PR = \exp(a + b\rho_b + c\theta_m)$
۳	Upadhyaya et al. (1982)	a, b, c	$PR = a\rho_b^b \exp(c\theta_m)$
۴	Upadhyaya et al. (1982)	a, b, c	$PR = a\rho_b^b \exp(c\theta_v)$
۵	Upadhyaya et al. (1982)	a, b	$PR = a \exp(b\theta_m)$
۶	Busscher and Sojka (1987)	a, b, c	$PR = a\rho_b^b \theta_m^c$
۷	Busscher and Sojka (1987)	a, b, c	$PR = a\rho_b^b \theta_v^c$
۸	Busscher et al. (1997)	a, b	$PR = a \exp(b\rho_b)$
۹	Mielke et al. (1994)	a, b	$PR = a\theta_m^b$
۱۰	Mielke et al. (1994)	a, b	$PR = a\theta_v^b$
۱۱	To and Kay (2005)	a, b	$PR = a\varphi^b$
۱۲	Dexter et al. (2007)	a, b, c	$PR = a + b\left(\frac{1}{S}\right) + c\sigma'$

در رابطه‌های بالا ρ_b ، θ_m ، θ_v ، ϕ ، S و σ' به ترتیب بیانگر چگالی ظاهری، رطوبت جرمی، رطوبت حجمی، مکش ماتریک، شیب منحنی نگهداشت رطوبتی در نقطه عطف و تنش مؤثر و همچنین a ، b و c ضرایب تجربی (بدون بعد) می‌باشند. نمونه‌های جمع‌آوری شده پس از انتقال به آزمایشگاه، هوا خشک شده، سپس کوبیده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. اندازه‌گیری چگالی ظاهری (BD) به روش سیلندر (بلک و هارتجی، ۱۹۸۶)، بافت خاک به روش هیدرومتری (جی و باودر، ۱۹۸۶)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) به روش الک تر (ون باول، ۱۹۴۹) و بر روی نمونه‌های دست‌نخورده و مقاومت فروروی خاک با استفاده از دستگاه فروسنج الکترونیکی در ۳ تکرار برای هر نقطه انجام شد. به دلیل این‌که رطوبت خاک از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر مقاومت فروروی است، در زمان اندازه‌گیری مقاومت فروروی از خاک موردنظر نیز نمونه‌برداری صورت گرفت و با روش درصد وزنی رطوبت خاک تعیین گردید. سپس این رطوبت با استفاده از منحنی نگهداشت رطوبتی در هر نقطه به مکش معادل آن تبدیل شد. ماده آلی (OC) به روش اکسیداسیون تر (والکلی و بلک، ۱۹۳۴) بر روی ذرات کوچک‌تر از ۰/۵ میلی‌متر، کربنات کلسیم معادل (CaCO_3) به روش حرارت‌دهی و تیتراسیون برگشتی با اسید کلریدریک (نلسون، ۱۹۸۲)، نسبت جذب سدیم (SAR) به کمک روش‌های معمول آزمایشگاهی شامل اندازه‌گیری کلسیم و منیزیم محلول توسط روش کمپلکسومتری و سدیم محلول به وسیله دستگاه فلیم‌فتومتر (پیچ و همکاران، ۱۹۸۲) و هدایت الکتریکی (EC) در عصاره اشباع خاک و واکنش خاک (pH) در گل اشباع به ترتیب توسط دستگاه‌های EC متر و pH متر اندازه‌گیری شدند (پیچ و همکاران، ۱۹۸۲). درصد رطوبت اشباع به روش وزن‌سنجی، مقادیر رطوبت وزنی خاک‌های دست‌نخورده در مکش ماتریک ۱۰ کیلوپاسکال توسط ستون آویزان آب و در مکش‌های ماتریک ۳۳، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال با استفاده از دستگاه صفحات فشاری تعیین شد. برای به دست آوردن پارامترهای منحنی نگهداشت رطوبتی و ن‌گن‌وختن (۱۹۸۰) از نرم‌افزار RETC استفاده گردید. سپس مقادیر شاخص‌های S (شیب منحنی نگهداشت رطوبتی در نقطه عطف منحنی) و σ' (تنش مؤثر) مدل دکستر (رابطه ۱۲) با استفاده از رابطه‌های زیر به دست آمد.

$$S = -n(\theta_{sat} - \theta_{res}) \left[1 + \frac{1}{m} \right]^{-(1+m)} \quad (1)$$

که در آن، m و n پارامترهای تعیین کننده شکل منحنی نگهداشت رطوبتی (بدون بعد)، θ_{sat} : رطوبت حجمی اشباع (سانتی متر مکعب بر سانتی متر مکعب) و θ_{res} : رطوبت حجمی باقی مانده (سانتی متر مکعب بر سانتی متر مکعب) در مدل ون گنوختن می باشند.

$$\sigma' = \chi h \quad (2)$$

$$\chi = \frac{(\theta_{sat} - \theta_{res})}{\theta_{max} - \theta_{res}} \quad (3)$$

$$h(\chi) = \frac{1}{\chi} \left[\chi^{\frac{1}{m}} - 1 \right]^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

که در آن، χ : درجه اشباع و h : مکش آب منفدی بر حسب هکتوپاسکال می باشد. به منظور تعیین پارامترهای مدل های مورد نظر، تابع هدف به گونه زیر تعریف شد:

$$SSE = \sum_{j=1}^n (PR(m)_j - PR(p)_j)^2 \quad (5)$$

که در آن، SSE : مجموع مربعات خطا، $PR(m)_j$: مقدار مقاومت فروروی اندازه گیری شده و $PR(p)_j$: مقدار مقاومت فروروی پیش بینی شده می باشد. صحت عملکرد مدل های مورد بررسی در برآورد مقاومت فروروی برای هر خاک با محاسبه آماره های میانگین خطا (ME)^۱، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)^۲ و ضریب همبستگی پیرسون (r) تعیین گردید.

1- Mean Error
2- Root Mean Square Error

$$ME = \frac{\sum_{j=1}^n PR(p)_j - PR(m)_j}{n} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (PR(p)_j - PR(m)_j)^2}{n}} \quad (7)$$

$$r = \frac{\sum_{j=1}^n (PR(p)_j - \overline{PR}(p)_j)(PR(m)_j - \overline{PR}(m)_j)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (PR(p)_j - \overline{PR}(p)_j)^2 \cdot \sum_{j=1}^n (PR(m)_j - \overline{PR}(m)_j)^2}} \quad (8)$$

که در آن‌ها، $PR(p)_j$: مقادیر برآورد شده (خروجی مدل)، $PR(m)_j$: مقادیر مشاهده شده (واقعی) و n : تعداد داده‌ها می‌باشد. یکی دیگر از آماره‌هایی که برای ارزیابی مدل‌های مقاومت فروروی مورد بررسی به کار گرفته شد، آماره میانگین قدرمطلق میانگین خطاهای (MAME) برآورد مقاومت فروروی در خاک‌های مختلف بود. تفاوت این آماره با آماره میانگین MEها (MME) آن است که خطای ناشی از سرشکن شدن خطاهای برآورد در خاک‌های مختلف، وارد فرآیند ارزیابی مدل‌ها نمی‌شود. به عبارت دیگر، مقدار آن متأثر از مقادیر مثبت و منفی خطای برآورد در تک‌تک خاک‌ها نخواهد بود. با توجه به آنچه گفته شد، مدلی که از میانگین قدر مطلق MEها (MAME) و میانگین RMSE (MRMSE) کم‌تر و میانگین ضریب همبستگی پیرسون (MPearson) بیش‌تری برخوردار باشد، نسبت به دیگر مدل‌ها، دارای عملکرد بهتری در برآورد مقاومت فروروی خواهد بود.

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک‌های منطقه مورد مطالعه: ویژگی‌های خاک‌های منطقه مورد بررسی در دو عمق ۰-۴۰ و ۴۰-۸۰ سانتی‌متری که برای ارزیابی مدل‌های مقاومت فروروی به کار رفته است، در جدول‌های ۲ و ۳ آمده است.

نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار جلد (۴)، شماره (۲) ۱۳۹۳

جدول ۲- ویژگی های خاک های چهار کشت و صنعت مورد مطالعه در عمق ۰-۴۰ سانتی متری.

امیرکبیر		دعبل خزاعی		کشت و صنعت	ویژگی
انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین		
۱۳/۳۰	۳۸/۹۰	۷/۹۵	۳۷/۰۱		رس (درصد)
۸/۵۲	۳۰/۸۴	۷/۴۷	۳۸/۵۰		سیلت (درصد)
۱۸/۹۸	۳۰/۳۱	۹/۵۰	۲۴/۲۴		شن (درصد)
۰/۳۶	۱	۰/۴۹	۱/۰۷		ماده آلی (درصد)
۱/۵۷	۳۹/۹۶	۱/۱۱	۴۰/۶۱		آهک (درصد)
۰/۱۴	۱/۶۰	۰/۱۱	۱/۵۷		چگالی ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب)
۰/۱۲	۷/۸۳	۰/۲۰	۷/۷۶		اسیدیته
۱/۱۹	۳/۹۱	۳/۳۰	۵/۴۷		هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)
۲/۲۵	۸/۳۵	۲/۶۷	۸/۳۰		نسبت جذب سدیم (-)
۲/۶۴	۹/۸۸	۳/۰۰	۹/۸۰		سدیم قابل تبادل (درصد)
۰/۲۳	۱/۰۷	۰/۲۶	۰/۹۸		میانگین وزنی قطر خاکدانه ها (میلی متر)
۰/۴۱	۰/۹۷	۰/۴۰	۰/۹۸		مقاومت فروروی* (MPa)

* اندازه گیری شده در مکش ۳۳ کیلو پاسکال.

ادامه جدول ۲- ویژگی های خاک های مورد مطالعه در عمق ۰-۴۰ سانتی متری.

هفت تپه		کارون		کشت و صنعت	ویژگی
انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین		
۳/۱۳	۳۹/۴۴	۳/۷۲	۳۵/۰۰		رس (درصد)
۲/۵۴	۳۸/۱۴	۲/۵۴	۴۵/۲۰		سیلت (درصد)
۳/۱۸	۲۲/۴۰	۴/۰۴	۱۹/۸۰		شن (درصد)
۰/۳۵	۱/۴۴	۰/۳۶	۱/۱۳		ماده آلی (درصد)
۱/۸۵	۳۸/۰۶	۱/۴۲	۳۶/۷۴		آهک (درصد)
۱/۰۰	۱/۶۹	۰/۰۸	۱/۶۷		چگالی ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب)
۰/۱۱	۷/۹۰	۰/۱۱	۷/۸۶		اسیدیته
۰/۱۴	۰/۶۸	۰/۷۵	۱/۹۹		هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)
۰/۸۲	۱/۴۶	۱/۹۱	۴/۰۱		نسبت جذب سدیم (-)
۱/۱۸	۰/۲۰	۲/۳۷	۴/۳۸		سدیم قابل تبادل (درصد)
۰/۱۵	۱/۳۸	۰/۳۳	۱/۲۸		میانگین وزنی قطر خاکدانه ها (میلی متر)
۰/۴۷	۱/۱۷	۰/۶۳	۱/۱۵		مقاومت فروروی* (MPa)

* اندازه گیری شده در مکش ۳۳ کیلو پاسکال.

فرزاد مرادی و همکاران

جدول ۳- ویژگی های خاک های چهار کشت و صنعت مورد مطالعه در عمق ۸۰-۴۰ سانتی متری.

امیرکبیر		دعبل خزاعی		کشت و صنعت	ویژگی
انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین		
۱۰/۴۰	۴۳/۶۱	۱۳/۲۳	۳۸/۶۰		رس (درصد)
۸/۵۲	۳۲/۷۱	۹/۱۲	۴۰/۰۷		سیلت (درصد)
۱۵/۱۸	۲۳/۶۷	۱۰/۲۲	۲۱/۳۳		شن (درصد)
۰/۳۲	۰/۶۹	۰/۴۱	۰/۷۷		ماده آلی (درصد)
۱/۵۴	۴۰/۳۰	۱/۵۹	۴۰/۶۹		آهک (درصد)
۰/۱۶	۱/۶۴	۰/۱۰	۱/۵۸		چگالی ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب)
۰/۱۱	۷/۹۰	۰/۱۳	۷/۷۶		اسیدیته
۰/۷۷	۲/۴۲	۱/۹۱	۳/۲۴		هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)
۳/۰۶	۷/۹۲	۲/۶۷	۶/۷۷		نسبت جذب سدیم (-)
۲/۵۱	۹/۳۷	۲/۲۷	۸		سدیم قابل تبادل (درصد)
-	-	-	-		میانگین وزنی قطر خاکدانه ها (میلی متر)
۰/۴۱	۱/۶۶	۰/۶۵	۱/۲۹		مقاومت فروروی* (MPa)

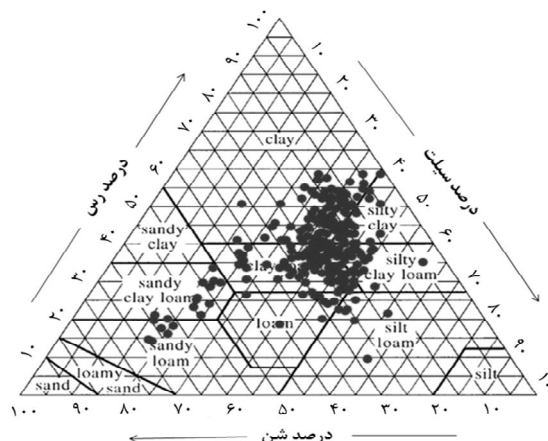
* اندازه گیری شده در مکش ۳۳ کیلو پاسکال.

ادامه جدول ۳- ویژگی های خاک های مورد مطالعه در عمق ۸۰-۴۰ سانتی متری.

هفت تپه		کارون		کشت و صنعت	ویژگی
انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین		
۴/۹۷	۴۰/۳۲	۶/۴۶	۳۸/۲۹		رس (درصد)
۳/۵۴	۳۶/۲۹	۳/۲۸	۴۳/۷۱		سیلت (درصد)
۵/۶۰	۲۳/۳۹	۴/۶۲	۱۸		شن (درصد)
۰/۴۲	۱/۱۵	۰/۴۱	۰/۶۵		ماده آلی (درصد)
۱/۸۹	۳۸/۲۰	۱/۴۵	۳۹/۰۸		آهک (درصد)
۰/۰۷	۱/۷۵	۰/۰۷	۱/۶۵		چگالی ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب)
۰/۱۰	۷/۸۲	۰/۱۳	۷/۷۸		اسیدیته
۰/۱۷	۰/۶۰	۰/۷۸	۱/۳۹		هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)
۰/۸۲	۱/۵۶	۰/۷۷	۱/۵		نسبت جذب سدیم (-)
۰/۳۲	۰/۷۶	۱/۴۱	۰/۹۲		سدیم قابل تبادل (درصد)
-	-	-	-		میانگین وزنی قطر خاکدانه ها (میلی متر)
۰/۸۵	۲/۱۵	۰/۴۶	۱/۹۸		مقاومت فروروی* (MPa)

* اندازه گیری شده در مکش ۳۳ کیلو پاسکال.

خاک‌های مورد مطالعه آهکی، به‌دست آمده از رسوبات تبخیری با دامنه بافتی از لوم شنی تا رسی بودند (شکل ۲).



شکل ۲- توزیع فراوانی نسبی ذرات خاک‌های مورد مطالعه.

با مراجعه به مقادیر بالای مقاومت فروروی در عمق ۸۰-۴۰ سانتی متری (اندازه‌گیری شده در مکش ۳۳ کیلوپاسکال)، به وضوح مقادیر بیش از حد تراکم خاک و تغییر شرایط بهینه رشد گیاه ناشی از عبور و مرور ادوات کشاورزی سنگین (تراکتور، پخش‌کننده‌های کود، دروگرها و کامیون‌های حمل‌نی) مشاهده می‌گردد. همچنین، شخم در رطوبت نامناسب و تر و خشک شدن خاک بعد از آن می‌تواند باعث تحکیم خاک و افزایش مقاومت فروروی و چگالی ظاهری خاک گردد که با توجه به مقادیر بالای چگالی ظاهری (دامنه‌ای از ۱/۷۵-۱/۵۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب به ترتیب در عمق اول کشت و صنعت دعبل خزاعی و عمق دوم کشت و صنعت هفت‌تپه) به وضوح قابل تشخیص می‌باشد. ریونشیلد و باشوک (۲۰۰۷) محدوده نرمال چگالی ظاهری در خاک‌هایی با بافت رسی را ۱/۶-۱ (گرم بر سانتی‌مترمکعب) و برای خاک‌هایی با بافت شنی را ۱/۸-۱/۲ (گرم بر سانتی‌مترمکعب) می‌دانند. این پژوهشگران همچنین بیان می‌کنند که محدودیت رشد ریشه‌ها در خاک‌هایی با بافت رسی و شنی به ترتیب در چگالی ظاهری بزرگ‌تر و مساوی ۱/۴ (گرم بر سانتی‌مترمکعب) و بزرگ‌تر و مساوی ۱/۶ (گرم بر سانتی‌مترمکعب) اتفاق خواهد افتاد. محدوده چگالی ظاهری بسیاری از خاک‌های متراکم شده در مناطق شهرنشین ۲-۱/۶ (گرم بر سانتی‌مترمکعب) می‌باشد و بیش‌تر گیاهان بهترین رشد را در خاک‌هایی با وضعیت خاکدانه‌ای و زهکشی مناسب و چگالی ظاهری کم‌تر از ۱/۵ (گرم بر سانتی‌مترمکعب) دارند (کراول، ۱۹۸۵).

میزان بالاتر مقاومت فروروی در عمق‌های پایین‌تر (۸۰-۴۰ سانتی‌متری) را می‌توان به فشار ناشی از وزن ذرات رویی، مقادیر پایین‌تر ماده آلی و بالاتر رس در این عمق نسبت داد (جدول ۲). خاک‌های رسی در بیش‌تر مواقع سال در حالت خمیری باقی می‌مانند که آن‌ها را تراکم‌پذیرتر می‌سازد (ناصری و همکاران، ۲۰۰۷). کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار مقاومت فروروی اندازه‌گیری شده در مکش ۳۳ کیلوپاسکال، ۰/۹۷ مگاپاسکال در عمق اول کشت و صنعت امیرکبیر و ۲/۱۵ مگاپاسکال در عمق دوم کشت و صنعت هفت‌تپه بود. مقادیر متفاوت مقاومت فروروی بیانگر تغییرپذیری مکانی و زمانی (مرتبط با کشت و صنعت‌های مختلف و سال‌های کشت) بالای ویژگی بالا می‌باشد. اتوو و همکاران (۲۰۱۱) در بررسی‌های خود نتیجه گرفتند که رشد ریشه گیاه نیشکر تحت‌تأثیر مقاومت فروروی کم‌تر از ۰/۷۵ مگاپاسکال قرار نگیرد اما به‌طور قابل‌توجهی در مقاومت فروروی بین ۲-۰/۷۵ مگاپاسکال به درجات مختلف کاهش پیدا کرد. این پژوهشگران بیان کردند که در مقاومت‌های فروروی بالاتر از ۲ مگاپاسکال رشد ریشه‌های گیاه نیشکر به‌شدت کاهش خواهد یافت. طبق طبقه‌بندی کهنگ (رفیع، ۱۹۶۸) و با توجه به میزان ماده آلی موجود در خاک‌های مورد بررسی (دامنه‌ای از ۱/۴۴-۰/۶۵ درصد در هر دو عمق) می‌توان آن را در گروه خیلی کم هوموسی تا کم هوموسی قرار داد. طبق طبقه‌بندی کهنگ (رفیع، ۱۹۶۸) خاک‌هایی با ماده آلی بین ۰-۱ در گروه خیلی کم هوموسی و بین ۱-۲ در گروه کم هوموسی قرار می‌گیرند. در خاک‌های مورد بررسی، افزایش میزان ماده آلی با افزایش تعداد سال‌های کشت همراه بوده است. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، میانگین وزنی قطر (MWD) خاکدانه‌ها با دامنه‌ای از ۰/۹۸-۱/۳۸ میلی‌متر تغییر می‌کند. مقایسه ارقام به‌دست آمده با طبقه‌بندی لال (۱۹۹۴) بیانگر محدودیت شدید تا متوسط در پایداری خاکدانه‌ها می‌باشد. پایداری کم خاکدانه‌ها بر خلاف مقادیر بالای رس و آهک، مقدار پایین SAR و همچنین میزان مناسب ماده آلی را می‌توان ناشی از عبور و مرور بیش از حد ادوات کشاورزی سنگین و به‌خصوص در رطوبت نامناسب، دانست. طبق طبقه‌بندی لال (۱۹۹۴)، خاک‌هایی با MWD بین ۰/۵-۱ میلی‌متر محدودیت شدید و بین ۱-۲ میلی‌متر محدودیت متوسط دارند. نظر به میانگین مقادیر ESP، EC، pH، خاک کشت و صنعت دعبل خزاعی در رده خاک‌های شور قرار می‌گیرد در حالی که در دیگر کشت و صنعت‌های مورد بررسی این گونه نیست.

مقایسه عملکرد مدل‌های مقاومت فروروی ارائه شده: مقادیر ضرایب و آماره‌های ارزیابی عملکرد هر یک از مدل‌های مقاومت فروروی مورد بررسی به تفکیک دو عمق کاربردی در جدول‌های ۴ و ۵ آورده شده است.

نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار جلد (۴)، شماره (۲) ۱۳۹۳

جدول ۴- ضرایب و شاخص‌های آماری مورد ارزیابی در معادله‌های ارایه شده برای برآورد مقاومت فروری عمق اول (۰-۴۰ سانتی متری).

معادله		میانگین a	میانگین b	میانگین c
$PR = \exp(a + b\rho_b + c\theta_v)$	۱	۰/۱۹	-۰/۲۷	۰/۷۷
$PR = \exp(a + b\rho_b + c\theta_m)$	۲	۰/۲۱	-۰/۲۴	۰/۸۵
$PR = a\rho_b^b \exp(c\theta_m)$	۳	۰/۶۱	۰/۷۸	۰/۹۲
$PR = a\rho_b^b \exp(c\theta_v)$	۴	۰/۵۷	۰/۷۴	۰/۸۵
$PR = a \exp(b\theta_m)$	۵	۰/۸۹	۰/۹۷	۱
$PR = a\rho_b^b \theta_m^c$	۶	۱/۲۸	۱/۱۳	۰/۴۸
$PR = a\rho_b^b \theta_v^c$	۷	۱/۲۶	۱/۱۲۳	۰/۶۳
$PR = a \exp(b\rho_b)$	۸	۰/۷۵	۰/۲۱	۱
$PR = a\theta_m^b$	۹	۱/۴۲	۰/۲۳	۱
$PR = a\theta_v^b$	۱۰	۱/۵	۰/۳۴	۱
$PR = a\varphi^b$	۱۱	۰/۵۰	-۰/۲۷۰	۱
$PR = a + b\left(\frac{1}{S}\right) + c\sigma'$	۱۲	۰/۳۲	۰/۱۲	۰/۵۴

ادامه جدول ۴- ضرایب و شاخص‌های آماری مورد ارزیابی در معادله‌های ارایه شده برای برآورد مقاومت فروری عمق اول (۰-۴۰ سانتی متری).

معادله		Mpearson	MRMSE	MME	MAME
$PR = \exp(a + b\rho_b + c\theta_v)$	۱	۰/۹۹۱	۰/۵۰	۰/۰۴۵	۰/۵۰
$PR = \exp(a + b\rho_b + c\theta_m)$	۲	۰/۹۹	۰/۵۰۴	۰/۰۴۵	۰/۵۰۴
$PR = a\rho_b^b \exp(c\theta_m)$	۳	۰/۹۹۷	۰/۴۸۷	۰/۰۴۲	۰/۴۸۷
$PR = a\rho_b^b \exp(c\theta_v)$	۴	۰/۹۹۱	۰/۴۸۸	۰/۰۴۲	۰/۴۸۸
$PR = a \exp(b\theta_m)$	۵	۰/۹۹۸	۰/۴۸۶	۰/۰۴۳	۰/۴۸۶
$PR = a\rho_b^b \theta_m^c$	۶	۰/۹۸۵	۰/۵۰۶	۰/۰۴۶	۰/۵۰۶
$PR = a\rho_b^b \theta_v^c$	۷	۰/۹۸۹	۰/۵۰۸	۰/۰۴۶	۰/۵۰۸
$PR = a \exp(b\rho_b)$	۸	۰/۹۹۸	۰/۴۷	۰/۰۴۸	۰/۰۵
$PR = a\theta_m^b$	۹	۰/۹۸۷	۰/۵۰۰	۰/۰۴۵	۰/۵۰۰
$PR = a\theta_v^b$	۱۰	۰/۹۸۷	۰/۵۰۳	۰/۰۴۶	۰/۵۰۳
$PR = a\varphi^b$	۱۱	۰/۱۱۲	۱/۱۱۷	۱/۰۱۲	۱/۰۱۹
$PR = a + b\left(\frac{1}{S}\right) + c\sigma'$	۱۲	۰/۳۵	۱/۴۵	۱/۰۳۴	۱/۰۴۴

فرزاد مرادی و همکاران

جدول ۵- ضرایب و شاخص‌های آماری مورد ارزیابی در معادله‌های ارایه شده برای برآورد مقاومت فروری عمق دوم (۸۰-۴۰ سانتی متری).

معادله		میانگین a	میانگین b	میانگین c
$PR = \exp(a + b\rho_b + c\theta_v)$	۱	۰/۳۴	-۰/۰۶۸	۰/۸۰
$PR = \exp(a + b\rho_b + c\theta_m)$	۲	۰/۳۶	-۰/۰۳	۰/۸۸
$PR = a\rho_b^b \exp(c\theta_m)$	۳	۰/۸۹	۰/۹۴	۰/۹۷
$PR = a\rho_b^b \exp(c\theta_v)$	۴	۰/۸۲	۰/۹۰	۰/۹۳
$PR = a \exp(b\theta_m)$	۵	۱/۴۵	۱/۰۷۶	۱
$PR = a\rho_b^b \theta_m^c$	۶	۱/۴۰	۱/۲۰	۰/۲۷
$PR = a\rho_b^b \theta_v^c$	۷	۱/۴۴	۱/۲۳	۰/۴۱
$PR = a \exp(b\rho_b)$	۸	۰/۸۹	۰/۳۷	۱
$PR = a\theta_m^b$	۹	۱/۵۴	-۰/۰۱	۱
$PR = a\theta_v^b$	۱۰	۱/۷۱	۰/۰۵۸	۱
$PR = a\varphi^b$	۱۱	۰/۴۹	-۰/۱۶	۱
$PR = a + b\left(\frac{1}{S}\right) + c\sigma'$	۱۲	۰/۲۵	۰/۱۳	۰/۴۹

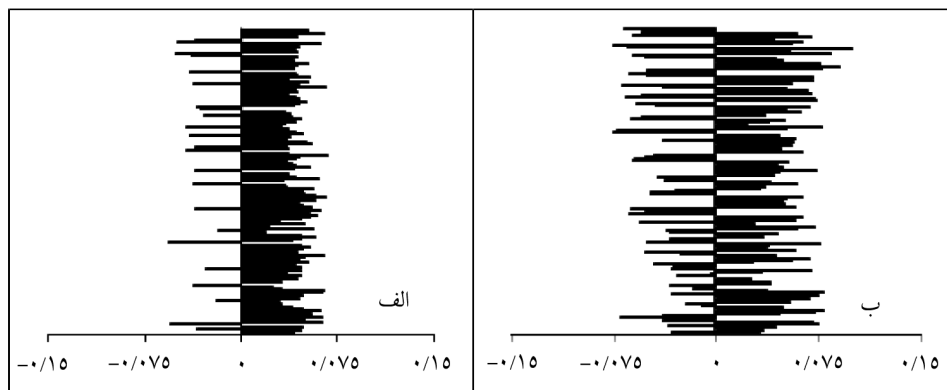
ادامه جدول ۵- ضرایب و شاخص‌های آماری مورد ارزیابی در معادله‌های ارایه شده برای برآورد مقاومت فروری عمق دوم (۸۰-۴۰ سانتی متری).

معادله		Mpearson	MRMSE	MME	MAME
$PR = \exp(a + b\rho_b + c\theta_v)$	۱	۰/۸۴	۰/۷۶	۰/۰۶۸	۰/۰۶۹
$PR = \exp(a + b\rho_b + c\theta_m)$	۲	۰/۸۴	۰/۷۵	۰/۰۶۹	۰/۰۷
$PR = a\rho_b^b \exp(c\theta_m)$	۳	۰/۸۶	۰/۷۰	۰/۰۶۴	۰/۰۶۶
$PR = a\rho_b^b \exp(c\theta_v)$	۴	۰/۸۶	۰/۷۱	۰/۰۶۵	۰/۰۶۶
$PR = a \exp(b\theta_m)$	۵	۰/۸۴	۰/۷۴	۰/۰۶۵	۰/۰۶۶
$PR = a\rho_b^b \theta_m^c$	۶	۰/۸۵	۰/۷۳	۰/۰۶۵	۰/۰۶۶
$PR = a\rho_b^b \theta_v^c$	۷	۰/۸۵	۰/۷۳	۰/۰۶۶	۰/۰۶۷
$PR = a \exp(b\rho_b)$	۸	۰/۸۶	۰/۷۱	۰/۰۶۵	۰/۰۶۸
$PR = a\theta_m^b$	۹	۰/۸۴	۰/۷۴	۰/۰۶۶	۰/۰۶۸
$PR = a\theta_v^b$	۱۰	۰/۸۴	۰/۷۴	۰/۰۶۶	۰/۰۶۷
$PR = a\varphi^b$	۱۱	۰/۱۲	۱/۷۹	۱/۰۷	۱/۰۷
$PR = a + b\left(\frac{1}{S}\right) + c\sigma'$	۱۲	۰/۲۸	۱/۶۵	۱/۰۴۶	۱/۰۵۵

با توجه به جدول‌های بالا و مقایسه مقادیر آماره MME به وضوح مشخص است که همه مدل‌های مورد بررسی در هر دو عمق یاد شده، مقاومت فروروی را بیش از مقادیر واقعی برآورد نموده‌اند. به علاوه، با توجه به آماره‌های ضریب همبستگی پیرسون، MRMSE و MAME، تابع پیشنهاد شده توسط تو و کی (۲۰۰۵) که مقاومت فروروی را تابعی از مکش ماتریک می‌داند و تابع ارایه شده توسط دکستر و همکاران (۲۰۰۷) که در آن مقاومت فروروی تابعی از شیب منحنی نگهداشت رطوبتی در نقطه عطف و تنش مؤثر است، ضعیف‌ترین عملکرد را در برآورد مقاومت فروروی در هر دو عمق کاربردی دارند. تفاوت محسوسی نیز در آماره‌های نام‌برده بین دیگر مدل‌های باقی‌مانده وجود ندارد. مقادیر پایین آماره MRMSE بیانگر آن است که در مقایسه با توابع ارایه شده توسط تو و کی (۲۰۰۵) و دکستر و همکاران (۲۰۰۷)، سایر مدل‌های مورد بررسی در هر دو عمق مقاومت فروروی را با خطای کم‌تری برآورد کرده‌اند. بررسی مقادیر آماره میانگین ضریب همبستگی پیرسون نیز بیانگر آن است که تمامی مدل‌های ارزیابی شده در هر دو عمق در مقایسه با معادله‌های تو و کی (۲۰۰۵) و دکستر و همکاران (۲۰۰۷)، برازش بهتری بر داده‌های اندازه‌گیری شده مقاومت فروروی داشته‌اند. بنابراین با توجه به مقدار بالای ضرایب همبستگی و مقادیر پایین MRMSE و MAME در تمام مدل‌های مورد بررسی که مقاومت فروروی را به‌عنوان توابعی از رطوبت جرمی، رطوبت حجمی و چگالی ظاهری برآورد می‌کنند، می‌توانند در مناطق مورد بررسی در برآورد مقاومت فروروی با دقت مناسب استفاده شوند.

با توجه به جدول‌های ۴ و ۵، نزدیک بودن مقدار آماره‌های MME و MAME در مدل ۸ ارایه شده توسط باسچر و همکاران (۱۹۹۷) که مقاومت فروروی را تابعی نمایی از چگالی ظاهری می‌داند و مدل‌های ۱۱ و ۱۲ به‌ترتیب ارایه شده توسط تو و کی (۲۰۰۵) و دکستر و همکاران (۲۰۰۷) مربوط به عمق اول بیانگر این نکته است که مدل‌های نام‌برده از نظر بیش‌برآوردگری عملکردی یکسان در تمام مناطق مورد مطالعه داشته‌اند. در نتیجه می‌توان گفت که این مدل‌ها به‌طور سیستماتیک بیش‌برآوردگر بوده و انحرافی جزئی در بیش‌برآورد کردن مقاومت فروروی در خاک‌های مختلف مناطق مورد مطالعه از خود نشان داده‌اند. این در حالی است که ویژگی نام‌برده در بالا در عمق دوم، تقریباً در همه مدل‌ها وجود دارد. اگر چه مدل‌های ۱۱ و ۱۲ ارایه شده توسط تو و کی (۲۰۰۵) و دکستر و همکاران (۲۰۰۷) بالاترین خطای برآورد را به خود اختصاص داده‌اند. بنابراین مطابق با بیانات داوسون و ویبلی (۲۰۰۱) و همچنین نتایج این پژوهش، کاربرد چند شاخص اندازه‌گیری خطا

برای ارزیابی عملکرد مدل‌های بسط داده شده، الزامی است. برای فهم موضوع بالا، مقادیر آماره میانگین خطای برآورد مقاومت فروروی برای تمامی داده‌های به دست آمده از عمق اول نمونه برداری مربوط به مدل‌های ۸ و ۷ به ترتیب نماینده کم‌ترین و بیش‌ترین اختلاف بین آماره‌های MME و MAME در شکل ۳ آورده شده است. این شکل بیانگر پایداری برآوردهای مدل ۸ در برابر مدل ۷ در تمامی مناطق نمونه برداری است.



شکل ۳- پراکنش میانگین خطاهای (ME) برآورد مقاومت فروروی (مگاپاسکال) در عمق اول نمونه برداری به وسیله دو مدل الف (۸ و ب) ۷.

پایین بودن نتایج به دست آمده از ارزیابی عملکرد مدل‌های ۱۱ و ۱۲ بیانگر اصل منطقه‌ای بودن کاربرد مدل‌ها در برآورد خصوصیتی خاص دارد. طبق این اصل هدف از استخراج مدل‌های تجربی مقاومت فروروی آن است که به بهترین وجه بر داده‌های مقاومت فروروی که نتیجه مطالعات در منطقه‌ای خاص می‌باشند، برازش یابند در نتیجه بیش‌تر مدل‌های توسعه یافته برای یک منطقه خاص ممکن است برآوردهای مناسبی برای مناطق دیگر نداشته باشند. این موضوع توسط پژوهشگران مختلفی از جمله واگنر و همکاران (۲۰۰۱)، نمز و همکاران (۲۰۰۲) و رحیمی لک و همکاران (۲۰۰۹) بیان شده است.

شاید بتوان دیگر دلیل کم بودن عملکرد تابع ۱۲ را خطاهای غیرقابل چشم‌پوشی در اندازه‌گیری منحنی نگهداشت رطوبتی و پارامترهای به دست آمده از آن (S و σ') دانست. همچنین در تعیین

پارامترهای مدل ۱۲ از ضرایب فیزیکی - تجربی مدل ون گنوختن (θ_{res} ، θ_{sat} ، n و m) بهره گرفته می‌شود در حالی که ممکن است معادله بالا به خوبی بر داده‌های رطوبتی به دست آمده از مناطق مورد بررسی، برازش نیابد. با توجه به جدول‌های ۴ و ۵، مقادیر پایین‌تر خطا و پراکندگی کم‌تر در برآوردهای مقاومت فروروی به‌عنوان تابعی از رطوبت جرمی و حجمی حاصل خواهد شد نسبت به زمانی که پتانسیل ماتریک به‌عنوان متغیر مستقل استفاده شود. موضوع بالا به احتمال زیاد به برآورد پتانسیل ماتریک معادل مقادیر رطوبتی به دست آمده از منحنی نگهداشت رطوبتی برمی‌گردد. نتایج مشابهی نیز توسط باسچر (۱۹۹۰) و واز و همکاران (۲۰۱۱) گزارش شده است. تفاوت ناچیز در شاخص‌های ارزیابی عملکرد بیش‌تر مدل‌های مورد بحث به استثنای مدل‌های ۱۱ و ۱۲ در هر دو عمق بیانگر وجود رابطه معنی‌دار بین مقاومت فروروی و پارامترهای برآوردگر مورد کاربرد در این مدل‌ها (محتوی رطوبتی و چگالی ظاهری) در مناطق مورد بررسی می‌باشد. پژوهشگران بسیاری پارامترهای بالا را مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار در مقاومت فروروی می‌دانند (دکستر و همکاران، ۲۰۰۷؛ والی و همکاران، ۲۰۰۷). بیات و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که استفاده از فاکتور درجه اشباع نسبی، می‌تواند برآوردهای مقاومت فروروی به‌عنوان تابعی از رطوبت جرمی، چگالی ظاهری و تخلخل کل را افزایش دهد. به‌علاوه با مقایسه توابع مشابه به وضوح قابل فهم است که بیش‌تر توابعی که از رطوبت جرمی به‌عنوان متغیر مستقل استفاده می‌کنند نسبت به توابع مشابهی که محتوی رطوبتی را به‌صورت حجمی به‌کار برده‌اند از آماره‌های ارزیابی عملکرد تقریباً یکسانی برخوردارند. این در حالی است که اسمیت و همکاران (۱۹۹۷) و واز و همکاران (۲۰۱۱) رطوبت حجمی را در برآورد مقاومت فروروی مؤثرتر از رطوبت جرمی می‌دانند. پژوهشگران نام‌برده، انعکاس تغییر ویژگی‌های فیزیکی خاک طی مرطوب شدن در پارامتر رطوبت حجمی را دلیل موضوع بالا می‌دانند. دلیل تضاد بالا را شاید بتوان به نامناسب بودن ذاتی ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد بررسی در این پژوهش دانست، در حالی که پژوهشگران نام‌برده پژوهش‌های خود را بر روی خاک‌های رده اکسی‌سول، آلتی‌سول و آلفی‌سول با دامنه وسیعی از ویژگی‌های فیزیکی انجام داده‌اند که یقیناً نمود تغییر ویژگی‌های فیزیکی خاک در رطوبت حجمی روشن‌تر خواهد بود.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش نتایج به دست آمده از ارزیابی عملکرد ۱۲ مدل برآوردگر مقاومت فروروی مورد تأکید در منابع مورد بررسی قرار گرفت. تفاوت ناچیز در شاخص‌های ارزیابی عملکرد بیش‌تر

مدل‌های مورد بحث به‌استثنا مدل‌های ۱۱ و ۱۲ به‌ترتیب ارایه شده توسط تو و کی (۲۰۰۵) و دکستر و همکاران (۲۰۰۷) در هر دو عمق بیانگر وجود رابطه معنی‌دار بین مقاومت فروروی و پارامترهای برآوردگر مورد کاربرد در این مدل‌ها (محتوی رطوبتی و چگالی ظاهری) در مناطق مورد بررسی می‌باشد. مدل‌های ۱۱ و ۱۲ در هر دو عمق یاد شده، بالاترین مقدار خطا را براساس آماره‌های مورد ارزیابی شامل بودند که نشان از ناکارآمدی این دو مدل در برآورد مقاومت فروروی در کشت و صنعت‌های مورد بررسی می‌باشد. علت این امر، تأییدی بر پذیرفتن اثر منطقه‌ای مدل‌های تجربی بوده به‌طوری‌که این مهم توسط پژوهشگران بسیاری تأکید شده است. پذیرفتن اثر منطقه‌ای بودن مدل‌های تجربی از یک‌سو و محدود بودن مدل‌های توسعه‌یافته برای برآورد مقاومت فروروی خاک‌های کشورمان، به‌عنوان یک راه‌حل عمده در صرفه‌جویی زمان و هزینه، از دیگر سو، می‌تواند انگیزه قوی برای پژوهشگران جوان علوم خاک برای پرداختن به این مهم باشد.

منابع

1. Bayat, H., Neyshabouri, M.H., Hajabbasi, M.A., Mahboubi, A.A., and Mosaddeghi, M.R. 2008. Comparing neural networks, linear and nonlinear regression techniques to model penetration resistance. *Turk. J. Agric. For.* 32: 425-433.
2. Bengough, A.G., Campell, D.J., and O'Sullivan, M.F. 2001. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth, P 377-403. In: Smith, K.A and C.E. Mullins (ed.), *Soil and environmental analysis*. 2nd ed. Marcel Dekker, New York.
3. Blake, G.R., and Hartge, K.H. 1986. Bulk density, P 363-375. In: Klute, A. (ed.), *Methods of soil analysis*, 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA. Madison, WI.
4. Busscher, W.J., and Sojka, R.E. 1987. Enhancement of subsoiling effect on soil strength by conservation tillage. *Trans. ASAE.* 30: 888-892.
5. Busscher, W.J. 1990. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Trans. ASAE.* 33: 519-524.
6. Busscher, W.J., Bauer, P.J., Camp, C.R., and Sojka, R.E. 1997. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. *Soil Tillage Research.* 43: 205-217.
7. Craul, P.J. 1985. A description of urban soils and their desired characteristics. *J. Arboricul.* 11: 330-339.
8. Dawson, C.W., and Wilby, R.L. 2001. Hydrological modeling using artificial neural networks. *Prog. Phys. Geogr.* 25: 80-108.

9. Dexter, A.R., Czyz, E.A., and Gate, O.P. 2007. A method for prediction of soil penetration resistance. *Soil Tillage Research*. 93: 412-419.
10. Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1986. Particle size analysis, P 383-411. In: *Methods of soil analysis*, 2nd ed. Klute, A. (ed.), Agron. Monogr. 9. ASA. Madision, WI.
11. Jakobsen, B.F., and Dexter, A.R. 1987. Effect of soil structure on wheat root growth, water uptake and grain yield. A computer simulation model. *Soil Tillage Research*. 10: 331-345.
12. Lal, R. 1994. *Methods and Guidelines for Assessing Sustainable Use of Soil Water Resources in the Tropics*. SMSS Technical Monograph, Columbus. Ohio. 78p.
13. Lapen, D.R., Topp, G.G., Edwards, M.E., Gregorich, E.G., and Curnoe, W.E. 2004. Combination cone penetration-water content relationships in tillage research. *Soil Tillage Research*. 79: 51-62.
14. Lor-Zadeh, Sh., Nadian, H.A., Bakhshandeh, A., Nurmohammadi, Gh., and Darvish, F. 2002. Effects of different levels of soil compaction on yield, yield components and sucrose in sugarcane cv. CP 48-103, in Khuzestan. *J. Agric. Sci.* 4: 36-47.
15. Materechera, S.A., Dexter, A.R., and Alston, A.M. 1991. Penetration of very strong soils by seedling roots of different plant-species. *Plant Soil*. 135: 31-41.
16. Mielke, L.N., Powers, W.L., Badri, S., and Jones, A.J. 1994. Estimation soil water content from soil strength. *Soil Tillage Research*. 31: 199-209.
17. Naseri, A.A., Jafari, S., and Alimohammadi, M. 2007. Soil compaction due to sugarcane (*Saccharum officinarum*) mechanical harvesting and the effects of subsoiling on the improvement of soil physical properties. *J. Appl. Sci.* 7: 3639-3648.
18. Nelson, R.E. 1982. Carbonate and gypsum, P 181-199. In: Page, A.L. (ed.), *Methods of Soil Analysis*, part 2. ASA, Madison, WI.
19. Nemes, A., Schaap, M., and Wosten, H. 2002. Validation of international scale soil hydraulic pedotransfer functions for national scale applications. 17th WCSS. 4: 1-10.
20. Otto, R., Silva, A.P., Franco, H.C.J., and Oliveira, E.C.A. 2011. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. *Soil Tillage Research*. 17: 201-210.
21. Page, A.L., Miller, R.H., and Keeney, D.R. 1982. *Methods of soil analysis. Part 2-Chemical and Microbiological methods*. Second edition, Soil Science Society of America, Inc. Publisher Madison, Wisconsin, USA.
22. Rafie, M.J. 1968. *Soil physics*. Tehran University Press. 296p. (In Persian)
23. Rahimi Lake, H., Akhbarzadeh, A., and Taghizadeh Mehrjardi, R. 2009. Development of pedotransfer functions (PTFs) to predict soil physico-chemical and hydrological characteristics in southern coastal zones of the Caspian Sea. *J. Ecol. Natur. Environ.* 1: 160-172.

24. Raper, R.L. 2005. Agriculture traffic impacts on soil. *J. Terramechanics*. 42: 259-280.
25. Rivenshield, A., and Bassuk, N.L. 2007. Using Organic Amendments to Decrease Bulk Density and Increase Macroporosity in Compacted Soils. *Sci. J. Inter. Soc. Arboricul.* 33: 140-146.
26. Smith, C.W., Johnston, M.A., and Lorentz, S. 1997. The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of South African forestry soils. *Geoderma*. 78: 93-111.
27. Taylor, H.M., and Brar, G.S. 1991. Effect of soil compaction on root development. *Soil Tillage Research*. 19: 111-119.
28. To, J., and Kay, B.D. 2005. Variation in penetrometer resistance with soil properties: the contribution of effective stress and implications for pedotransfer functions. *Geoderma*. 126: 261-276.
29. Upadhyaya, S.K., Kemble, L.J., and Collins, N.E. 1982. Cone index prediction equations for Delaware soils. *ASAE*. 82: 1452-1456.
30. Van Bavel, C.H.M. 1949. Mean weight diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 14: 20-23.
31. Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.
32. Vaz, C.M.P., Manieri, J.M., De Maria, I.C., and Tuller, M. 2011. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. *Geoderma*. 166: 92-101.
33. Wagner, B., Tarnawski, V.R., Hennings, V., Muller, U., Wessolek, G., and Plagge, R. 2001. Evaluation of pedotransfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. *Geoderma*. 102: 275-279.
34. Walkly, A., and Black, I.A. 1934. An examination of digestion method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration. *Soil Science*. 37: 29-38.
35. Whalley, W.R., To, J., Kay, B.D., and Whitmore, A.P. 2007. Prediction of the penetrometer resistance of soils with models with few parameters. *Geoderma*. 137: 370-377.



Evaluating some penetration resistance models in some Khuzestan sugarcane agro-industries

***F. Moradi¹, B. Khalili Moghadam², S. Jafari² and Sh. Ghorbani Dashtaki³**

¹M.Sc. Student, Dept. of Soil Science, Khuzestan-Ramin University of Agriculture and Natural Resources, Ahvaz, ²Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Khuzestan-Ramin University of Agriculture and Natural Resources, Ahvaz, ³Associate Prof., Dept. of Soil Science, Shahrekord University

Received: 01/14/2013; Accepted: 07/08/2013

Abstract

Functions that accurately relate penetration resistance to soil properties are important tools for assessing the spatial variation of soil mechanical resistance when the temporal and spatial variability in these parameters cannot be readily measured. The importance of this characteristic has encouraged the soil researchers to model this process for quantitative applications. In this study, the performance of twelve penetration resistance models were evaluated for two depths. i.e. 0-40 and 40-80 cm. For this purpose, the penetration data were obtained using of digital penetrometer from 150 points of different Khuzestan sugarcane agro-industry. The parameters of these models were then determined using the least square optimization method. In order to evaluate the accuracy of the models, the mean error (ME), root mean square error (RMSE), mean absolute of mean error (MAME) and Pearson correlation coefficient (r) statistics were calculated. The results of comparison models performance revealed that the whole proposed regression models based on moisture content and bulk density had lower error and higher r in estimating the penetration resistance. Furthermore, the models proposed by To and Kay based on pore water suction and Dexter et al. based on the slope of the water retention curve at its inflection point and effective stress have highest error and lowest r in estimating the penetration resistance. Generally, all of the evaluated models were systematically over-estimator models.

Keywords: Model, Penetration resistance, Sugarcane agro-industry

* Corresponding Authors; Email: farzadmp2@yahoo.com