

ارزیابی توابع انتقالی رگرسیونی در برآورد دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR) با به کارگیری ویژگی‌های خاک

حسین بیات¹، لادن حیدری و گلناز ابراهیم زاده

دانشیار گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا-همدان؛ h.bayat@basu.ac.ir

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا-همدان؛ heydari1370@gmail.com

دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا-همدان؛

ebrahimzade.golnaz@gmail.com

دریافت: 95/8/24 و پذیرش: 96/7/12

چکیده

دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت² (LLWR) از شاخص‌های مهم فیزیکی و کیفی خاک بوده که اندازه‌گیری آن کاری دشوار و زمان‌بر است. هدف از این پژوهش، برآورد LLWR با بهره‌گیری از پارامترهای زود یافت خاک با روش رگرسیونی است. در این پژوهش، بعد از جمع‌آوری 192 نمونه خاک از 24 محل در استان آذربایجان غربی، منحنی‌های مشخصه رطوبتی، مشخصه مقاومت خاک و تراکم محصور آنها اندازه‌گیری شد. برای تخمین چهار حد رطوبتی تعیین‌کننده LLWR (θ_{SR} ، θ_{AFP} ، θ_{PWP} ، θ_{Fc}) ابتدا خصوصیات پایه خاک (رس و نسبت سیلت به شن)، به‌عنوان متغیرهای ورودی استفاده شد و مدل پایه ایجاد شد. سپس، با افزودن خصوصیات منحنی تراکم محصور و فیزیکی-شیمیایی در گام‌های مختلف به متغیرهای ورودی پیشین، مجموعاً هفت تابع انتقالی ایجاد شد. با وارد کردن پارامترهای تراکم محصور به‌تنهایی و به‌همراه خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مختلف به ترتیب در گام‌های دوم و سوم برای برآورد حدود رطوبتی LLWR و محاسبه آن، ریشه میانگین مربعات خطا و معیار اطلاعات آکایک به‌طور معنی‌دار کاهش یافتند. مقادیر R محاسبه‌شده برای PTFها نشان داد که استفاده از PTF_3 ، PTF_5 و PTF_7 به‌جای PTF_1 برآورد حدود رطوبتی را به مقدار فراوانی بهبود بخشید (R مساوی 0/70، 0/73 و 0/77 به ترتیب برای PTF_3 ، PTF_5 و PTF_7 در مقابل 0/39 برای PTF_1). بنابراین می‌توان حدود رطوبتی را با دقت قابل قبولی ($AIC = -154/31$) و $R = 0/77$) با استفاده از پارامترهای منحنی تراکم محصور به همراه خصوصیات فیزیکی و شیمیایی تخمین زد.

واژه‌های کلیدی: تراکم محصور، منحنی مشخصه آب خاک، منحنی مشخصه مقاومت خاک

¹ نویسنده مسئول، ادرس: گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا-همدان، همدان.

² Least limiting water range

مقدمه

تراکم محصور قابل استخراج هستند عبارتند از تنش پیش تراکمی⁷ (P_c)، شاخص تراکم⁸ (C_c) و شاخص توروم⁹ (C_s) که این سه ویژگی معرف مشخصه فشردگی می-باشند. می توان منحنی تراکم محصور را به دو ناحیه مجزا تقسیم نمود: 1) ناحیه برگشت پذیر کشسانی در تنش های پایین که خط فشردگی مجدد¹⁰ (RCL) یا خط تورم نامیده می شود و شیب این خط را شاخص توروم (C_s) می نامند. 2) ناحیه خطی در تنش های بالاتر که خط فشردگی بکر¹¹ (VCL) نام دارد و شیب آن شاخص تراکم (C_c) نام دارد. نقطه ی انتقال بین ناحیه برگشت پذیر کشسانی و ناحیه خطی، "تنش پیش-تراکمی" نامیده می شود که حساسیت خاک را به فشردگی یا مقاومت در برابر فشردگی نشان می دهد.

شاخص تورم و تراکم به ترتیب انعطاف پذیری و قابلیت تراکم خاک را نشان می دهند. از عوامل مؤثر بر میزان تراکم پذیری خاک می توان به مقدار رطوبت خاک، میزان رس، ماده آلی و جرم مخصوص ظاهری اشاره کرد. شاخص تراکم همبستگی مثبت با مقدار رس دارد (کلر و همکاران، 2011). همچنین کلر و همکاران (2004) افزایش تنش پیش تراکمی و شاخص تراکم با مقدار رس خاک را گزارش کردند. برابدا و همکاران (2006) گزارش کردند که با افزایش درصد ماده آلی میزان تراکم پذیری خاک کاهش پیدا می کند. مطالعات فراوانی نشان داده اند که با افزایش جرم مخصوص ظاهری و کاهش نسبت پوکی تنش پیش تراکمی افزایش و شاخص تراکم کاهش خواهد یافت (تانگ و همکاران، 2009).

داسیلوا و کی (1997) اثر خصوصیات خاک مانند مقدار ماده آلی، درصد رس و چگالی ظاهری بر LLWR را از طریق ایجاد توابع انتقالی برای منحنی مشخصه رطوبتی و منحنی مشخصه مقاومت خاک بررسی کردند. سپس با استفاده از این توابع، پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه حد بالایی و حد پایینی LLWR را به دست آورده و زمان لازم برای اندازه گیری LLWR را کاهش دادند. نتایج آن ها نشان داد که مقدار LLWR با چگالی ظاهری و مقدار رس رابطه معکوس و با مقدار مواد آلی رابطه مستقیم دارد. همچنین، نیشابوری و همکاران (2014) نیز از ویژگی هایی از قبیل بافت، کربن آلی، جرم مخصوص ظاهری، کربنات کلسیم، اکسیدهای فلزی و نسبت سدیم تبادل برای برآورد مستقیم LLWR با روش مدیریت

فراهمی مستمر آب خاک یکی از تعیین کننده ترین عوامل برای رشد گیاه محسوب می شود. گیاهان در صورت فقدان دسترسی به آب و تهویه کافی دچار تنش می شوند. مقدار آب خاک از یک سو بر مقاومت فروری خاک و از سوی بر تخلخل تهویه ای تأثیرگذار بوده و برهم کنش این سه عامل (رطوبت، تهویه و مقاومت فروری خاک) میزان رشد ریشه و گیاه را تعیین می کند. دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت¹ (LLWR) دامنه ای از رطوبت خاک بوده که در آن رشد گیاه در ارتباط با مکش ماتریک، تهویه و مقاومت مکانیکی خاک با کمترین محدودیت روبرو است (داسیلوا و همکاران، 1994). با استفاده از LLWR، عوامل فیزیکی مؤثر بر رشد گیاه در یک پارامتر خلاصه شده و می توان از آن به عنوان شاخصی برای ارزیابی ساختمان خاک استفاده کرد.

چهار حد رطوبتی تعیین کننده LLWR، مقدار آب خاک در رطوبت ظرفیت مزرعه ای² (θ_{FC}) در پتانسیل ماتریک 100 سانتی متر، مقدار آب خاک در نقطه پژمردگی دائم³ (θ_{PWP}) در پتانسیل ماتریک 15000 سانتی متر، مقدار آب خاک در تخلخل تهویه ای⁴ 10 درصد (θ_{AFP}) و مقدار آب خاک در مقاومت فروری معادل دو مگا پاسکال⁵ (θ_{SR}) در نظر گرفته می شود (داسیلوا و کی، 1996). به علت دشواری های اندازه گیری LLWR و پرهزینه و زمان بر بودن آن، روش های غیرمستقیم در تخمین LLWR ترجیح داده می شوند. یکی از این روش ها، توابع انتقالی⁶ (PTFs) خاک است که داده های دیرپافت خاک را از داده های زودپافت برآورد می کنند.

تراکم خاک از عوامل مهم و از شاخص های نشان دهنده تخریب فیزیکی خاک است. تراکم عبارت است از تغییر حجم خاک غیراشباع و در نتیجه افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک تحت تأثیر یک نیروی خارجی. کلر و آرویدسون (2007) گزارش کردند که بهره گیری از روابط تنش فشاری و کرنش حجمی، از روش های ارزیابی تراکم پذیری خاک است. منحنی تنش و کرنش و یا منحنی تراکم محصور خاک از طریق رسم لگاریتم تنش قائم در مقابل نسبت پوکی یا کرنش عمودی خاک (محصور در داخل یک سیلندر) به دست می آید. سه پارامتر مهم که از منحنی تنش و کرنش خاک در آزمایش

7. Pre-compaction stress

8. Compression index

9. Swelling index

10. Recompression line

11. Virgin compression line

1. Least limiting water range

2. Water content at field capacity

3. Water content at wilting point

4. Air-filled porosity

5. Water content at 2 MPa penetration resistance

6. Pedotransfer functions

بر اساس توابعی که در این تحقیق ایجاد خواهند شد، در مرحله استفاده از این توابع دیگر نیازی به اندازه‌گیری مستقیم منحنی مشخصه رطوبتی خاک و منحنی مقاومت فروری خاک و یا θ_{FC} ، θ_{PWP} و θ_{SR} نیست. یعنی تنها با داشتن منحنی تراکم محصور و خصوصیات پایه خاک می‌توان حدود رطوبتی LLWR و در نتیجه خود آن را به دست آورد. برخلاف منحنی مشخصه رطوبتی خاک و منحنی مقاومت فروری خاک، منحنی تراکم محصور را می‌توان در یک مکش به دست آورد. حتی بعضاً نیازی به اندازه‌گیری در یک مکش خاص نیز نیست و اندازه‌گیری حدود 30 نمونه در یک روز به راحتی امکان‌پذیر است. علاوه بر این، پژوهش‌های مختلفی نشان داده‌اند که منحنی تراکم دارای شباهت نسبی با منحنی مشخصه رطوبتی خاک است. بنابراین، در این پژوهش سعی شد تا رابطه بین منحنی تراکم محصور و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی با ضرایب دامنه رطوبتی با کمترین محدودیت بررسی شود.

مرور منابع نیز نشان داد که تاکنون اثر پارامترهای تراکم محصور به همراه سایر ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی در قالب روش‌های رگرسیونی در برآورد غیرمستقیم دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین، هدف از این پژوهش بررسی بهبود برآورد حدود رطوبتی LLWR و نهایتاً برآورد غیرمستقیم LLWR با بهره‌گیری از ویژگی‌های فیزیکو-شیمیایی متعدد خاک و پارامترهای تراکم محصور است.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و خصوصیات خاک‌ها

در این پژوهش 192 نمونه از خاک‌های شاخص بر پایه سری خاک‌های غالب از استان آذربایجان غربی نمونه‌برداری شد. نمونه‌های برداشت‌شده از 24 محل و از هر محل هشت نمونه بود. نمونه‌های دست‌نخورده با استفاده از سیلندرهای استیل به قطر 5/3 و ارتفاع 4/5 سانتی‌متر برای تعیین منحنی مشخصه رطوبتی، منحنی مشخصه مقاومت، منحنی فشردگی محصور و جرم مخصوص ظاهری خاک جمع‌آوری و همچنین نمونه‌ها به شکل دست‌خورده برداشت و پس از هوا خشک‌کردن، برای برخی آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی آماده در آزمایشگاه کربن آلی خاک به روش اکسیداسیون تر (والکی و بلک، 1934)، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به روش باور و همکاران (1952)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون (سیمیس، 1996)، بافت خاک به روش

گروهی داده‌ها، روش رگرسیونی و شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده نمودند. حیدری و همکاران (1395) از پارامترهای تراکم محصور و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نیز برای برآورد مستقیم LLWR با روش رگرسیون استفاده نمودند.

بافت خاک، رطوبت و چگالی ظاهری عوامل تعیین‌کننده مقاومت مکانیکی خاک و در نتیجه تأثیرگذار بر منحنی مشخصه مقاومت خاک هستند. خاک خشک نسبت به خاک خیس و مرطوب، مقاومت مکانیکی بالاتری دارد. رینرت و همکاران (2002) گزارش کردند که در خاکی با چگالی ظاهری بین 1/25 و 1/3 گرم بر سانتی‌متر مکعب حد بالایی LLWR با θ_{FC} و حد پایینی با استفاده از θ_{PWP} مشخص می‌شود. درحالی‌که در تراکم‌های بالا فاکتور محدودکننده حد بالایی و حد پایینی به ترتیب θ_{AFP} و θ_{SR} است. در خاک شنی به دلیل کاهش اندازه منافذ، در اثر تراکم خاک ابتدا LLWR افزایش اما با تراکم بیشتر LLWR کاهش پیدا می‌کند (زو و همکاران، 2000). همچنین در میان فراوانی نسبی اندازه ذرات، رس قوی-ترین تأثیر را بر منحنی مشخصه رطوبتی دارد (داسیلوا و کی، 1997). در نتیجه، منحنی مشخصه مقاومت خاک و منحنی مشخصه رطوبتی وابستگی شدیدی به توزیع اندازه منافذ خاک و ساختمان خاک دارند. در همین راستا، اجایی و همکاران (2009) گزارش کردند که تنش پیش تراکمی و شاخص تراکم تحت تأثیر ساختمان خاک با توجه به مطالب فوق بسیاری از عوامل مؤثر بر پارامترهای تراکم محصور همان ویژگی و عوامل تعیین‌کننده و تأثیرگذار بر حدود رطوبتی LLWR می‌باشند که احتمالاً می‌توان از آن‌ها برای برآورد حدود رطوبتی استفاده کرد. با توجه به تأثیرپذیری هر سه منحنی تراکم محصور، منحنی مشخصه مقاومت و منحنی مشخصه رطوبتی از عواملی مانند رس، چگالی ظاهری، مواد آلی و رطوبت انتظار می‌رود که استفاده از پارامترهای منحنی تراکم محصور باعث بهبود برآورد حدود رطوبتی شود.

از سوی دیگر، برای اندازه‌گیری هر سه حد رطوبتی (θ_{FC} ، θ_{PWP} و θ_{SR}) لازم است که منحنی مشخصه رطوبتی خاک و منحنی مقاومت فروری خاک اندازه‌گیری شود. گاهی اوقات اندازه‌گیری این منحنی‌ها (به علت قرار دادن نمونه‌های خاک در دستگاه‌های صفحات تحت فشار) یک سال و یا بیشتر طول می‌کشد. زیرا برای اندازه‌گیری منحنی مشخصه رطوبتی و منحنی مقاومت فروری خاک نیاز به اندازه‌گیری رطوبت و مقاومت در مکش‌های مختلف است.

که در آن: θ_s^4 مقدار رطوبت اشباع ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) و D_s^5 جرم مخصوص حقیقی (gcm^{-3}) بود. LLWR تفاضل بین دو حد رطوبتی بالا و پایین است. حد بالایی آن رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای (θ_{FC}) یا رطوبت در تخلخل تهویه‌ای 10 درصد (θ_{AFP}) هرکدام که کمتر باشد و حد پایینی آن رطوبت در نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP}) یا رطوبت در مقاومت مکانیکی دو مگاپاسکال (θ_{SR}) هرکدام که بیشتر باشد (داسیلوا و همکاران، 1994).

منحنی فشردگی محصور

برای انجام آزمایش فشردگی محصور (CCT)⁶ از دستگاه تک‌محوری (CBR)⁷ بهره‌گیری شد (داویدوسکی و کولن، 1994). در آزمایش فشردگی محصور خاک در درون سیلندر صلب با استفاده از پیستون متحرک به سمت پایین متراکم شده و تنش روی پیستون تغییر حجم خاک به‌طور پیوسته ثبت شد. برای این آزمایش از نمونه‌های دست‌نخورده که از دستگاه صفحات فشاری در مکش 100 سانتی‌متر خارج و رطوبت آن پس از اعمال تراکم تعیین و بهره‌گیری شد. سپس، منحنی تراکم محصور با رسم نسبت پوکی (e) در مقابل لگاریتم تنش نرمال (σ) بر اساس معادله (4) به‌دست آمد. مدل گمپرتز (1825) (معادله 4) با استفاده از نرم‌افزار Solver Excel 2010 بر داده‌های بارگذاری منحنی تراکم محصور برازش شد و پارامترهای a ، b ، c و m به دست آمد. با بهره‌گیری از آن پارامترها، شاخص تراکم با معادله (5) و شاخص تورم با معادله (6) محاسبه شد. همچنین مختصات نقطه‌ی تقاطع خط فشردگی بکر و نیمساز خط افقی و خط مماس بر نقطه انحنای بیشینه منحنی نسبت پوکی - لگاریتم تنش به‌عنوان تنش پیش-تراکمی در نظر گرفته شد (کاساگراندا، 1936) (شکل 1).

$$e = a + c \exp \left\{ -\exp [b (\log \sigma - m)] \right\} \quad (4)$$

که در آن: a ، b ، c و m پارامترهای برازشی هستند. e بیانگر نسبت پوکی ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) و σ نیز بیانگر تنش نرمال اعمال‌شده بر روی نمونه خاک است.

$$C_c = \frac{bc}{\exp(1)} \quad (5)$$

$$C_s = \frac{e_0 \cdot e_{25kPa}}{\log(25kPa)} \quad (6)$$

هیدرومتر (گی و بایدر، 1986) و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش یودر (1936) اندازه‌گیری شدند.

منحنی مشخصه رطوبتی و منحنی مشخصه مقاومت خاک

برای تعیین منحنی مشخصه رطوبتی و مقاومت خاک، ابتدا نمونه‌های دست‌نخورده به مدت 24 ساعت از زیر اشباع شدند. سپس مقدار رطوبت در مکش‌های ماتریک 10، 20، 40 و 60 سانتی‌متر با دستگاه جعبه شن¹ (کلمنت، 1966) و مقدار رطوبت در مکش‌های 100، 300، 1000، 4000، 8000 و 15000 سانتی‌متر با استفاده از دستگاه صفحات تحت فشار² (کلوت، 1986) اندازه‌گیری شد. مقاومت فروری خاک در نمونه‌های دست‌نخورده در مکش‌های ماتریک 40 سانتی‌متر و به بالا پس از ایجاد تعادل با استفاده از دستگاه تک‌محوری (بنگوق و همکاران 2001) با قطر قاعده مخروط ریز فروسنج 2/5 میلی‌متر و زاویه مخروط 30 درجه اندازه‌گیری شد. جرم مخصوص ظاهری نیز برای هر سیلندر اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری θ_{FC} و θ_{PWP} مدل نمایی پیشنهادشده توسط داسیلوا و همکاران (1994) بر داده‌های آزمایشگاهی منحنی مشخصه رطوبتی برازش شد (معادله 1). مقادیر مقاومت فروری در برابر رطوبت و جرم مخصوص ظاهری با استفاده از مدل بوسچر (1990) تعیین شد (معادله 2).

$$\theta = \exp(\alpha + \beta D_b) \psi^\delta \quad (1)$$

$$SR = d \theta^e D_b^f \quad (2)$$

که در آن‌ها: ψ مکش ماتریک خاک (cm)، θ رطوبت حجمی خاک ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)، D_b جرم مخصوص ظاهری (gcm^{-3})، α ، β و δ پارامترهای مدل داسیلوا و همکاران (1994)، SR^3 مقاومت فروری خاک برحسب (MPa) و d و e ضرایب مدل بوسچر (1990) هستند. رطوبت ظرفیت مزرعه در مکش ماتریک 100 سانتی‌متر و رطوبت در نقطه پژمردگی در مکش ماتریک 15000 سانتی‌متر در نظر گرفته شد (سیلوا و همکاران، 2011). برازش داده‌ها از طریق نرم‌افزار SPSS صورت گرفت. رطوبت نظیر تخلخل تهویه‌ای 10 درصد از رابطه زیر محاسبه شد (کی و همکاران، 2006):

$$\theta_{AFP} = \theta_s - 0.1 = (1 - D_b / D_s) - 0.1 \quad (3)$$

4. Saturated water content

5. Soil particle density

6. Confined compression test

7. California bearing ratio

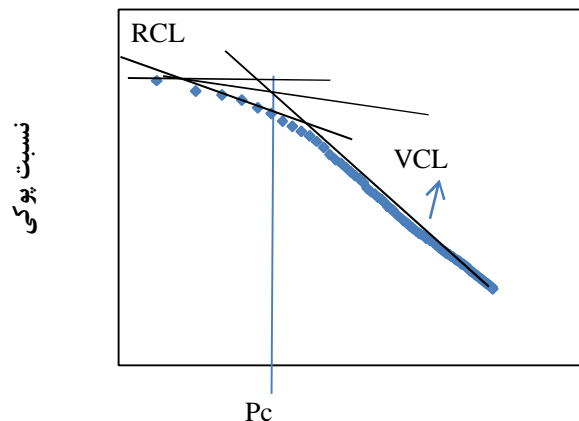
1. Sand box

2. Pressure plate

3. Soil resistance

بیانگر نسبت پوکی در حالتی که به نمونه 25 کیلو پاسکال تنش وارد شده، می‌باشند.

که در آن‌ها: C_c شاخص تراکم، C_s شاخص تورم، b و c ضرایب مدل گمپرتز، e_0 نسبت پوکی اولیه و e_{25} kPa



لگاریتم تنش

شکل 1- منحنی تراکم محصور خاک. P_c ، RCL و VCL به ترتیب نشان‌گر تنش پیش تراکمی، خط فشردگی مجدد و خط فشردگی بکر می‌باشند

به‌دست‌آمده بود و به‌عنوان یک متغیر برای مدل‌های متفاوت مقایسه شد. همچنین، نحوه مقایسه آماره‌ها در جدول 4 (برای هر حد رطوبتی) و جدول 7 (برآورد غیرمستقیم LLWR) با استفاده از آماره آکایک توابع نسبت به مدل اول بود و آماره آکایک تمام مدل‌ها نسبت به مدل اول مقایسه شد. در واقع، هر چه آکایک کوچک‌تر باشد کیفیت برازش بالاتر است. اگر انطباق کامل مقادیر اندازه‌گیری و تخمینی اتفاق بیافتد آکایک به سمت منفی بی‌نهایت میل خواهد کرد.

معیارهای ارزیابی دقت توابع انتقالی

برای بررسی دقت توابع انتقالی از آماره ریشه میانگین مربعات خطا $(RMSE)^2$ ، معیار اطلاعات آکایک $(AIC)^3$ (آکایک 1974)، ضریب تبیین $(R^2)^4$ و انحراف استاندارد $(SD)^5$ بهره‌گیری شد.

(7)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - Y_p)^2}$$

(8)

$$AIC = N \ln \left[\sum_{i=1}^N \frac{(Y_i - Y_p)^2}{N} \right] + 2n_p$$

² Root mean square error

³ Akaike information criterion

⁴ Coefficient of determination

⁵ Standard deviation

مراحل ایجاد توابع

در این پژوهش برای تهیه توابع انتقالی برای برآورد چهار حد رطوبتی تعیین‌کننده LLWR از روش رگرسیون خطی با نرم‌افزار SPSS بهره‌گیری شد. در آغاز همه متغیرها از دیدگاه نرمال بودن داده‌ها بررسی و آن‌هایی که توزیع نرمال نداشتند نرمال و سپس استاندارد شدند. برای بررسی اثر پارامترهای تراکم محصور و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بر حدود رطوبتی هفت مدل اصلی ساخته شد که ورودی‌های مدل‌ها در جدول (1) ارائه شده است. مدل رگرسیونی با دو متغیر ورودی نسبت لای به شن و رس (PTF_i) به‌عنوان مدل پایه انتخاب شد (جدول 1). سپس، با استفاده از این توابع، حد بالایی و حد پایینی LLWR تخمین زده شدند و در نهایت مقدار LLWR تخمینی بر اساس این حدود محاسبه شد.

تأثیر استفاده از متغیرهای ورودی از طریق مقایسه دقت مدل‌ها با آماره معیار اطلاعات آکایک $(AIC)^1$ و مقایسه میانگین آن مورد ارزیابی قرار گرفت. به این صورت که در جداول (5) و (6) مقایسه مدل‌ها و دقت تخمین حد رطوبتی از طریق مقایسه میانگین بین آماره ارزیابی دقت مدل انجام که بدین منظور از نرم‌افزار SAS 9.2 با آزمون استفاده شد. در واقع، برای این مقایسه میانگین آماره آکایک به‌عنوان یک متغیر در نظر گرفته شد که برای هر مدل مقدار مشخصی

¹ Akaike information criterion

نتایج و بحث

ویژگی‌های آماری کلیه متغیرهای مورد استفاده در این پژوهش در جدول (2) نشان داده شده است. خاک‌های 24 محل نمونه برداری در این پژوهش در چهار کلاس بافتی لوم (9 محل)، شنی لومی (1 محل)، لوم شنی (7 محل) و لوم سیلتی (7 محل) قرار گرفتند. خاک‌های مورد مطالعه در این پژوهش مطابق با کتاب تفسیر نتایج خاک (هزلتون و مورفی، 2007) از نظر هدایت هیدرولیکی در دامنه (متوسط تا بسیار زیاد) و همچنین از نظر چگالی ظاهری، ظرفیت تبادل کاتیونی و کربن آلی در دامنه متوسط قرار می‌گیرند.

$$R^2 = \frac{\left[N \left(\sum_{i=1}^N Y_i Y_p \right) - \sum_{i=1}^N Y_i \sum_{i=1}^N Y_p \right]^2}{\left[N \left(\sum_{i=1}^N Y_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^N Y_i \right)^2 \right] \times \left[N \left(\sum_{i=1}^N Y_p^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^N Y_p \right)^2 \right]} \quad (9)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum Y_i^2 - \left(\frac{\sum Y_i}{N} \right)^2}{N-1}}$$

n_p تعداد متغیرهایی که باید تخمین زده شوند، N تعداد نمونه خاک، Y_i و Y_p به ترتیب مقدار اندازه‌گیری شده و تخمینی LLWR و هرکدام از حدود رطوبتی آن است.

جدول 1- متغیرهای ورودی توابع ایجاد شده برای تخمین حدود رطوبتی LLWR

مرحله	متغیرهای ورودی برای هر مرحله	تابع انتقالی ایجاد شده
مرحله 1	*Si/S, Clay	PTF ₁
مرحله 2	Si/S, Clay, P _c , C _c , C _s	PTF ₂
مرحله 3	Si/S, Clay, P _c , C _c , C _s , MWD, OC	PTF ₃
مرحله 4	Si/S, Clay, P _c , C _c , C _s , CaCO ₃	PTF ₄
مرحله 5	Si/S, Clay, P _c , C _c , C _s , MWD, OC, CaCO ₃	PTF ₅
مرحله 6	Si/S, Clay, P _c , C _c , C _s , CEC	PTF ₆
مرحله 7	Si/S, Clay, P _c , C _c , C _s , MWD, OC, CaCO ₃ , CEC	PTF ₇

* P_c: تنش پیش تراکمی، C_c: شاخص تراکم، C_s: شاخص تورم، Si/S: نسبت لای به شن، Clay: رس، MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، OC: کربن آلی، CEC: گنجایش تبادل کاتیونی، CaCO₃: کربنات کلسیم معادل، PTF: تابع انتقالی.

همبستگی بین متغیرهای ورودی و خروجی

افزایش مقدار رس نسبت پوکی افزایش در نتیجه شاخص تراکم نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، شاید علت همبستگی مثبت بین شاخص تراکم، تنش پیش تراکمی و ظرفیت تبادل کاتیونی با θ_{FC} و θ_{PWP} را تأثیرپذیری هر یک از پارامترهای یاد شده از مقدار رس مطرح کرد. نسبت لای به شن با θ_{FC} و θ_{PWP} همبستگی مثبت و معنی‌دار (در سطح یک درصد) داشت (جدول 3). شاید علت نتیجه حاصله افزایش مقدار منافذ متوسط با افزایش مقدار سیلت باشد. منافذ متوسط در انتقال آب در مکش‌های یاد شده نقش اساسی دارند (آریان پور و شرفا 1392). θ_{AFP} همبستگی منفی و غیرمعنی‌داری با تنش پیش تراکمی دارد (جدول 3). مصدقی و همکاران (2003) گزارش کردند که جرم مخصوص ظاهری و نسبت پوکی به صورت غیرخطی بر حداکثر انحنای منحنی تنش و کرنش اثر می‌گذارند. در نتیجه، افزایش جرم مخصوص ظاهری، نسبت پوکی کاهش یافته و تنش در حداکثر انحنای منحنی افزایش و تنش پیش تراکمی افزایش می‌یابد. بنابراین، شاید علت همبستگی منفی مشاهده شده بین تنش پیش تراکمی و

برای ارزیابی همبستگی بین LLWR و چهار حد رطوبتی آن با متغیرهای ورودی از ضریب همبستگی خطی پیرسون استفاده شد (جدول 3). ماده آلی، مقدار رس، نسبت سیلت به شن و ظرفیت تبادل کاتیونی همبستگی مثبت و معنی‌داری (در سطح پنج یا یک درصد) با θ_{PWP} داشتند (جدول 3). بوتولا و همکاران (2012) گزارش کردند که همبستگی زیادی بین مقادیر رس و جرم مخصوص ظاهری با رطوبت در نقاط مختلف منحنی مشخصه رطوبتی بخصوص نقاط ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم وجود دارد. مصدقی و محبوبی (2011) نیز گزارش نمودند که سیلت و رس تأثیر معنی‌دار و مثبتی بر رطوبت نگه‌داری شده در مکش‌های مختلف دارند.

شاخص تراکم و تنش پیش تراکمی همبستگی مثبت ولی غیرمعنی‌داری با θ_{FC} و θ_{PWP} دارند (جدول 3). آیمهوف و همکاران (2004) نیز همبستگی مثبت بین مقدار رس با شاخص تراکم مشاهده کردند. در واقع، با

پژوهشگران شاخص تورم با مقدار ماده آلی و نسبت پوکی همبستگی مثبت دارد (کلر و همکاران 2011).

θ_{AFP} این نکته باشد. همبستگی مثبت و معنی‌داری (در سطح احتمال یک درصد) بین θ_{AFP} با شاخص تورم وجود داشت (جدول 3). بر اساس گزارش برخی

جدول 2- ویژگی‌های آماری متغیرهای مورد استفاده در این تحقیق.

متغیر	میانگین	ضریب تغییرات (%)	انحراف استاندارد	حداقل	حداکثر
θ_{FC} ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	0/36	16/7	0/063	0/23	0/50
θ_{PWP} ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	0/19	47/38	0/068	0/07	0/38
θ_{SR} ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	0/21	38/09	0/077	0/06	0/38
θ_{AFP} ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	0/36	13/88	0/046	0/24	0/46
LLWRi ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	0/11	63/63	0/072	0/00	0/30
P_c (kPa)	214	52	0/40	63/10	478/63
Log (P_c , kPa)	2/27	0/99	0/23	1/80	2/68
C_c	0/52	30/77	0/17	0/10	1/00
C_s	0/009	55/55	0/0053	0/00	0/02
Clay (%)	11/14	19/00	5/23	4/11	26/26
Log (Clay, %)	1	19/00	0/19	0/61	1/42
OC (%)	1/77	22/59	0/40	1/01	2/38
MWD (mm)	3/32	2/00	1/60	0/41	5/43
cos (MWD, mm)	-0/10	-570/0	0/57	-1/00	0/88
Si/S (-)	1/15	59/13	0/68	0/17	2/64
CEC ($\text{meq}100\text{g}^{-1}$)	10/54	55/88	5/89	0/65	23/70
CaCO ₃ (%)	7/25	29/66	2/15	4/03	43/14

* P_c : تنش پیش تراکمی، C_c : شاخص تراکم، C_s : شاخص تورم، Si/S: نسبت لای به شن، Clay: رس، MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، OC: کربن آلی، CEC: گنجایش تبادل کاتیونی، CaCO₃: کربنات کلسیم، θ_{FC} : رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای، θ_{PWP} : مقدار آب خاک در نقطه پژمردگی دائم، θ_{AFP} : مقدار آب خاک در تخلخل تهویه‌ای 10 درصد، θ_{SR} : مقاومت فروری معادل دو مگا پاسکال، LLWRi: دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت اندازه‌گیری شده. در این جدول مقادیر نرمال شده میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، تنش پیش تراکمی و رس نیز گزارش شده است.

جدول 3- همبستگی بین LLWR و چهار حد رطوبتی آن با متغیرهای ورودی

متغیر	P_c	C_c	C_s	MWD (mm)	OC (%)	CEC ($\text{meq}100\text{g}^{-1}$)	Clay (%)	CaCO ₃ (%)	Si/S (%)
θ_{FC}	0/03	0/11	0/03	-0/03	0/39	0/34	0/45*	0/27	0/56**
θ_{PWP}	0/21	0/10	-0/09	-0/20	0/47*	0/46*	0/48*	0/09	0/53**
θ_{SR}	0/24	-0/16	-0/23	-0/17	0/02	0/29	0/23	-0/21	0/24
θ_{AFP}	-0/26	0/16	0/56**	-0/1	-0/02	0/22	0/19	0/35	0/03
LLWR	-0/35	13/0	0/44*	-0/02	-0/24	-0/13	-0/32	0/22	-0/08

* و ** به ترتیب نشان‌دهنده همبستگی معنی‌دار در سطح پنج و یک درصد می‌باشند.

نتایج برآورد حدود رطوبتی LLWR با استفاده از خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و تراکم خاک با روش رگرسیون خطی

در جداول (4) و (5) نتایج مدل‌های رگرسیونی ارائه شده است. در همه مدل‌ها افزودن پارامترهای تراکم محصور اندازه R و RMSE را نسبت به مدل پایه بهبود بخشید و بر پایه مقایسه میانگین آماره AIC همه مدل‌ها دارای دقت بالاتری (معنی دار در سطح پنج درصد) نسبت به مدل پایه بودند (جدول 5). همان‌گونه که در جدول (4) مشاهده می‌شود، مدل اول نسبت به سایر مدل‌ها در هر چهار حد رطوبتی دارای AIC بیشتر است. چراکه علاوه بر بافت خاک بسیاری از خصوصیات‌های فیزیکی و شیمیایی و همچنین خواص مکانیکی خاک با تأثیرگذاری بر منحنی مشخصه رطوبتی و مقاومت خاک می‌توانند بر حدود رطوبتی تأثیر بگذارند. در مدل دوم افزودن پارامترهای تراکم محصور (تنش پیش تراکمی، شاخص تراکم و شاخص تورم) موجب بهبود دقت برآورد هر چهار حد رطوبتی نسبت به مدل پایه شد (جدول 4 و 5).

یکی از دلایل بهبود تخمین‌ها با استفاده از مدل دوم می‌تواند استفاده ترکیبی از خصوصیات بافتی و خصوصیات منحنی تراکم باشد. از سویی، حدود رطوبتی LLWR بر اساس منحنی‌های مشخصه رطوبتی و مقاومت خاک تعیین می‌شوند. ارتباط پارامترهای تراکم محصور با حدود رطوبتی را می‌توان با بررسی همبستگی این پارامترها با ساختمان خاک، منحنی مشخصه رطوبتی خاک و منحنی مشخصه مقاومت خاک مطالعه کرد. کنترل هر سه منحنی (منحنی مشخصه رطوبتی، مقاومت خاک و تراکم خاک) توسط عوامل مشترک باعث ایجاد ارتباط بین هر سه منحنی بوده و موجب شد که استفاده از ویژگی‌های منحنی تراکم به‌عنوان تخمین‌گر موجب بهبود تخمین حدود رطوبتی شود. حیدری و همکاران (1395) نیز گزارش کردند که استفاده از پارامترهای تراکم محصور باعث بهبود برآورد مستقیم LLWR شد. ابراهیمی و همکاران (1395) نیز گزارش کردند که استفاده از خصوصیات منحنی تراکم موجب بهبود تخمین منحنی مشخصه رطوبتی خاک شد. آن‌ها نیز علت بهبود تخمین را تشابه شکل دو منحنی (تراکم خاک و مشخصه رطوبتی خاک) و کنترل هر دو منحنی به‌وسیله عوامل مشترک گزارش کردند.

جدول 4- نتایج ارزیابی دقت برآورد PTF های ایجادشده برای تخمین چهار حد رطوبتی LLWR با استفاده از ویژگی‌های خاک

	R	RMSE (cm ³ cm ⁻³)	AIC	R	RMSE (cm ³ cm ⁻³)	AIC
	θ_{FC}			θ_{PWP}		
PTF ₁	0/56	0/05	-140/49	0/55	0/06	-136/21
PTF ₂	0/61	0/04	-142/33	0/64	0/05	-139/95
PTF ₃	0/71	0/04	-148/14*	0/78	0/04	-150/31*
PTF ₄	0/64	0/04	-143/84	0/64	0/04	-139/96
PTF ₅	0/72	0/04	-148/59*	0/79	0/04	-150/74*
PTF ₆	0/66	0/04	-144/95	0/77	0/04	-148/86*
PTF ₇	0/73	0/04	-149/87*	0/87	0/03	-162/08*
	θ_{SR}			θ_{AFP}		
PTF ₁	0/22	0/07	-123/21	0/22	0/04	-126/06
PTF ₂	0/51	0/06	-129/30*	0/63	0/03	-158/26*
PTF ₃	0/66	0/05	-135/46*	0/65	0/03	-159/08*
PTF ₄	0/50	0/06	-128/97	0/71	0/03	-163/31*
PTF ₅	0/66	0/05	-135/54*	0/73	0/03	-164/50*
PTF ₆	0/60	0/06	-132/53*	0/63	0/03	-158/26*
PTF ₇	0/74	0/05	-140/56*	0/73	0/03	-164/74*

* دارای تفاوت معنی‌داری در سطح پنج درصد با مدل اول

باعث کاهش معنی‌دار AIC و افزایش R² نسبت به مدل پایه (جدول 4 و 5) شد. مقدار ماده آلی از پارامترهای

در مدل سوم افزودن پارامترهای تراکم محصور به همراه کربن آلی و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به مدل

خاک همراه با پارامترهای تراکم محصور به علت همبستگی آن با متغیرهای خروجی، تأثیرگذاری بر ساختمان خاک و توزیع اندازه منافذ و همچنین افزایش متغیرهای ورودی باعث بهبود برآورد LLWR شود.

در مدل 5 از ورودی‌های مدل سه و چهار، (کربنات کلسیم، ماده آلی، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و پارامترهای تراکم محصور) به‌عنوان برآوردگر استفاده شد. بهره‌گیری از این برآوردگرها باعث بهبود معنی‌دار AIC تخمین تمام حدود رطوبتی نسبت به مدل پایه شد (جدول 4 و 5). با توجه به جدول (5) تفاوت معنی‌داری بین مدل پنجم با مدل دوم، سوم و چهارم وجود نداشت. ولی با توجه به جداول 4 و 5، مدل پنجم دارای AIC منفی‌تری است. داسیلوا و کی (1997) اثر خصوصیات ماده آلی، رس و چگالی ظاهری بر LLWR را از طریق ایجاد توابع انتقالی برای تخمین منحنی مشخصه رطوبتی و مقاومت خاک بررسی کردند. نصرتی (1386) نیز LLWR را به‌طور غیرمستقیم از طریق ایجاد توابع انتقالی برای چهار حد رطوبتی θ_{FC} ، θ_{AFP} ، θ_{SR} و θ_{PWP} با استفاده از پارامترهای رس، ماده آلی، جرم مخصوص ظاهری و کربنات کلسیم محاسبه کرد.

در مدل ششم نیز بهره‌گیری از CEC علاوه بر متغیرهای ورودی مدل دوم به‌عنوان برآوردگر موجب بهبود معنی‌دار برآورد حدود رطوبتی نسبت به مدل پایه شد (جدول 5). با مقایسه این سطح با مدل سوم نتایج دو سطح تفاوت معنی‌دار را نشان نداد (جدول 5). همچنین، با مقایسه مدل ششم نسبت به مدل چهارم، نتایج نشان داد که مدل ششم نسبت به مدل چهارم در برآورد حدود رطوبتی دارای AIC کمتر و R بیشتری است. هرچند تفاوت آن‌ها معنی‌دار نشد. بنابراین، در این پژوهش CEC نسبت به کربنات کلسیم برآوردگر بهتری برای حدود رطوبتی است. با مقایسه این سطح با مدل پنجم که در آن از ورودی‌های مدل دوم، سوم و چهارم استفاده شده بود، نتایج نشان داد که مدل پنجم با مدل ششم تفاوت معنی‌داری نداشت. بنابراین، به‌جای استفاده از کربنات کلسیم به همراه ماده آلی و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها می‌توان تنها از CEC برای تخمین حدود رطوبتی استفاده کرد.

در مدل هفتم نیز استفاده از ورودی‌های مرحله پنجم و ششم برای برآورد چهار حد رطوبتی LLWR موجب بهبود معنی‌دار برآورد حدود رطوبتی نسبت به مدل پایه و مدل دوم شد. ولی تفاوت بین مدل هفتم با مدل ششم، پنجم و سوم معنی‌دار نبود. هرچند با توجه به جدول (5) مدل هفتم موجب کاهش AIC نسبت به مدل ششم، پنجم

مهمی است که بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک تأثیر می‌گذارد (نمس و همکاران، 2005). در پژوهش بیات و همکاران (2013) استفاده از ماده آلی و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها باعث بهبود برآورد منحنی مشخصه رطوبتی خاک شد. دکستر و همکاران (2004) نشان دادند که شیب منحنی مشخصه رطوبتی در نقطه عطف در ارتباط با ماده آلی خاک است. احتمالاً علت این‌که در این سطح بهره‌گیری از ماده آلی و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به همراه پارامترهای تراکم محصور اثر معنی‌داری بر برآورد حدود رطوبتی LLWR داشتند، به دلیل تأثیر آن‌ها بر ساختمان خاک و منحنی‌های مشخصه رطوبتی و مقاومت خاک باشد. در واقع، OM، MWD و پارامترهای تراکم محصور هر سه جزء شاخص‌های ساختمان خاک هستند و از سویی حدود رطوبتی LLWR هم‌وابستگی زیادی با ساختمان خاک دارند. بنابراین، در این پژوهش با توجه به نقش کربن آلی و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در پایداری ساختمان خاک سعی شد تا تأثیر این دو پارامتر در کنار پارامترهای تراکم محصور در بهبود تخمین LLWR در نظر گرفته شود.

مدل چهارم نیز با استفاده از ورودی‌های مدل دوم به همراه کربنات کلسیم ایجاد شد (جدول 3). استفاده از کربنات کلسیم باعث کاهش معنی‌دار آکایک نسبت به مدل پایه شد (جدول 5)، اما بهبود معنی‌داری نسبت به مدل دوم و سوم ایجاد نکرد (جدول 5). کربنات کلسیم با تأثیرگذاری بر خاکدانه‌ها (بوجیلا و گالیلی، 2008) باعث پایداری ساختمان خاک شده و از سویی می‌تواند منحنی تراکم خاک، منحنی مقاومت، منحنی مشخصه رطوبتی و در نتیجه LLWR را تحت تأثیر قرار بدهد. نتایج رگرسیون خطی در پژوهش دولت‌آبادی (1389) نیز نشان داد که LLWR وابسته به مقدار رس، درصد ماده آلی، چگالی ظاهری و کربنات کلسیم است.

در این پژوهش، همبستگی مثبتی بین ماده آلی و θ_{FC} ، θ_{PWP} مشاهده شد (جدول 3). از سوی دیگر، آنابی و همکاران (2007) نقش مؤثر مواد آلی در افزایش پایداری خاکدانه‌ها و به دنبال آن ایجاد خاکدانه‌های بزرگ‌تر و افزایش مقدار MWD را با افزایش نیروی پیوستگی بین خاکدانه‌ها به‌وسیله ترکیبات موجود در مواد آلی مرتبط می‌دانند. احتمالاً ماده آلی با بهبود ساختمان خاک و افزایش منافذ متوسط (نمس و همکاران، 2005)، که مسئول نگهداری آب در مکش‌های بین FC و PWP می‌باشند، موجب افزایش LLWR می‌شود. علاوه بر این هر چه تعداد پارامترهای ورودی بیشتر باشد، دقت تخمین بهتر می‌شود. بنابراین، انتظار می‌رود که استفاده از ماده آلی

مدل‌های برتر به دست آمده از روابط رگرسیونی برای تخمین حدود رطوبتی استفاده کرد.

و سوم شد. بنابراین، در صورت در دسترس نبودن هریک از متغیرهای ورودی مدل هفتم با توجه به عدم تفاوت معنی دار، می‌توان از مدل‌های ششم، پنجم و سوم یا سایر

جدول 5- مقایسه میانگین دقت (آماره‌های AIC، R و RMSE) توابع ایجاد شده در هر مرحله برای تخمین حدود رطوبتی LLWR با استفاده از آزمون دانکن (5 درصد)

RMSE		R		AIC	PTF	
انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	
0/0129	0/055 ^a	0/19	0/39 ^d	8/19	-131/49 ^{a*}	PTF ₁
0/0129	0/045 ^b	0/05	0/59 ^c	11/96	-142/46 ^b	PTF ₂
0/008	0/040 ^{bc}	0/05	0/70 ^{abc}	9/81	-148/25 ^{bc}	PTF ₃
0/0125	0/043 ^{bc}	0/08	0/62 ^{bc}	14/32	-144/02 ^b	PTF ₄
0/0081	0/040 ^{ab}	0/05	0/73 ^{ab}	11/85	-149/84 ^{bc}	PTF ₅
0/0125	0/43 ^{bc}	0/07	0/67 ^{abc}	10/66	-146/15 ^{bc}	PTF ₆
0/0096	0/037 ^c	0/06	0/77 ^a	11/22	-154/31 ^c	PTF ₇

* میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشابه می‌باشند اختلاف معنی‌داری ندارند.

اصلی مؤثر بر θ_{SR} و همچنین دیگر حدود رطوبتی می‌باشند.

با مقایسه مدل‌های ایجاد شده برای حدود رطوبتی با استفاده از پارامترهای تراکم محصور و سایر ویژگی‌های خاک، مدل‌های ایجاد شده برای حدود رطوبتی θ_{PWP} و θ_{FC} اختلاف معنی‌داری باهم ندارند، اما مدل‌های ایجاد شده برای θ_{PWP} نسبت به θ_{FC} دارای AIC منفی‌تر و R بالاتر بودند (جدول 6). این نتیجه می‌تواند به علت همبستگی-های مشاهده شده بین θ_{PWP} با پارامترهای ورودی مدل‌ها باشد که باعث بهبود برآورد θ_{PWP} شد (جدول 3). همچنین، پارامترهای تراکم محصور به همراه خصوصیات فیزیکی و شیمیایی دیگر باعث بهبود معنی‌دار برآورد θ_{AFP} نسبت به سه حد رطوبتی θ_{PWP} ، θ_{FC} و θ_{SR} شدند. بامگارتل و کوخ (2004) گزارش کردند که تنش پیش تراکمی در ارتباط با جرم مخصوص ظاهری است. رطوبت نظیر تخلخل تهویه‌ای 10 درصد (θ_{AFP}) از رابطه $\theta_{AFP} = \theta_S - 0.1 = (1 - D_b / D_S) - 0.1$ محاسبه می‌شود. بنابراین، چگالی ظاهری و نسبت پوکی نیز با تأثیرگذاری بر ساختمان خاک بر منحنی تراکم و مقدار θ_{AFP} تأثیر می‌گذارند. همچنین، θ_{AFP} با استفاده از چگالی ظاهری در این مکش محاسبه شده است. بنابراین، با توجه به تأثیرپذیری مؤلفه‌های منحنی تراکم از چگالی ظاهری و نسبت پوکی، استفاده از آن‌ها باعث بهبود برآورد θ_{AFP} شد (جدول 6).

در واقع، میزان آماره آکایک از مدل اول به مدل هفتم به ترتیب کاهش یافته است که بهبود قابل توجه و افزایش R و همچنین کاهش مجذور میانگین مربعات خطا در این مدل‌ها نسبت به مدل اول را نشان می‌دهد. از مدل‌های 3 تا 7 این نکته دریافت شد که هرگاه از پارامترهای فیزیکی و شیمیایی مختلف و تراکم محصور باهم، برای برآورد حدود رطوبتی بهره‌گیری شد، میزان آماره R افزایش و AIC کاهش یافت. شاید علت نتیجه حاصله این باشد که حدود رطوبتی متأثر از بافت، ساختمان خاک و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مختلف است. به همین علت استفاده هم‌زمان از این پارامترها موجب بهبود تخمین حدود رطوبتی و LLWR شد.

با مقایسه آماره‌های مدل یک که شامل اجزاء بافت خاک هستند، با آماره‌های مدل‌هایی که از پارامترهای تراکم محصور بهره‌گیری شده مانند مدل‌های دوم و سوم، این نکته دریافت شد که پارامترهای تراکم محصور اطلاعات کامل‌تری از بافت خاک و ساختمان خاک را در اختیار مدل قرار می‌دهند و نسبت به اجزاء بافت خاک پارامتر قابل اطمینان‌تری می‌باشند. داسیلوا و کی (1997) نیز θ_{SR} را از طریق یک رابطه رگرسیونی به صورت تابعی از چگالی ظاهری و رطوبت خاک به دست آوردند. بنابراین، همان‌گونه که در این تحقیق به دست آمد روابط آن‌ها حاکی از آن است که بافت و ساختمان خاک عوامل

جدول 6- میانگین دقت برآورد چهار حد دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت با استفاده از آزمون دانکن (5 درصد)

حدود	θ_{FC}	θ_{PWP}	θ_{SR}	θ_{AFP}
AIC	-145/46 ^{b±}	-146/87 ^b	-132/250 ^a	-156/32 ^c

* میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشابه می‌باشند اختلاف معنی‌داری ندارند.

±. هر کدام از اعداد نشان‌دهنده میانگین اکایک PTF‌های ایجاد شده برای برآورد هر حد رطوبتی در 7 مرحله است

ظاهری و مقاومت فروری بر منحنی تراکم محصور و LWR تأثیر می‌گذارد. به همین علت استفاده از میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، کربن آلی و کربنات کلسیم، همراه با پارامترهای تراکم محصور به‌عنوان تخمین‌گر موجب بهبود تخمین LLWR شد. در پژوهش کاظمی (1388) نیز تأثیر بافت و ماده آلی بر برآورد مستقیم LLWR مثبت بود، ولی کربنات کلسیم تأثیر معنی‌داری بر بهبود تخمین LLWR نداشت. مطابق با جدول 7 ورودی‌های بهره‌گیری شده در مرحله 3، 5، 6 و 7 نیز نسبت به ورودی‌های مرحله 1، 2 و 4 (همانند نتایج به‌دست‌آمده برای چهار حد رطوبتی) نتایج بهتری را نشان دادند (دلایل در قسمت است). بنابراین، با توجه به مطالب مطرح‌شده، استفاده هم‌زمان از پارامترهای تراکم به همراه خصوصیات فیزیکی و شیمیایی باعث بهبود برآورد غیرمستقیم دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت شد (جدول 7). چراکه دامنه رطوبتی علاوه بر بافت خاک به خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی خاک وابسته است.

برآورد غیرمستقیم دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت در این بخش LLWR با استفاده از چهار حد رطوبتی برآورد شده از 7 تابع انتقالی جدول 1 محاسبه و مقایسه شد. جدول 7 نشان می‌دهد که افزودن پارامترهای تراکم محصور (تابع 2 تا تابع 7) به مدل پایه باعث بهبود معنی‌دار برآورد LLWR شد. همچنین، استفاده هم‌زمان از پارامترهای تراکم محصور و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی (تابع 3 تا تابع 7) باعث بهبود برآورد LLWR شد. با توجه به جدول 7 پارامترهای مورد استفاده در تابع 5 نسبت به سایر توابع، برآورد بهتری را ایجاد کردند. چراکه میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها شاخصی برای ارزیابی ساختمان خاک است (پیرمادیان و همکاران، 2005). دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت نیز شاخصی برای ارزیابی ساختمان خاک و تحت تأثیر آن است. همچنین، پایداری ساختمان خاک می‌تواند تحت تأثیر ماده آلی و کربنات کلسیم قرار گیرد. ساختمان خاک با تأثیرگذاری بر مؤلفه‌هایی مانند تخلخل، جرم مخصوص

جدول 7- آماره‌های ارزیابی دقت برآورد غیرمستقیم LLWR با استفاده از PTF‌های ایجاد شده در هفت مرحله

مکش	PTF	R ²	RMSE (cm ³ cm ⁻³)	AIC	ورودی مدل
	مرحله 1	0/15	0/069	-122/98	Si/S*,Clay
	مرحله 2	0/58	0/058	-134/50*	Si/S,Clay,P _c ,C _s ,C _s
	مرحله 3	0/71	0/0550	-142/47*	Si/S,Clay,P _c ,C _s ,C _s ,MWD,OC
LLWR _p	مرحله 4	0/52	0/0561	-131/82*	Si/S,Clay,P _c ,C _s ,C _s ,CaCO ₃
	مرحله 5	0/72	0/0527	-143/07*	Si/S,Clay,P _c ,C _s ,C _s ,MWD,OC, CaCO ₃
	مرحله 6	0/71	0/0551	-141/60*	Si/S,Clay,P _c ,C _s ,C _s ,CEC
	مرحله 7	0/71	0/0473	-141/20*	Si/S,Clay,P _c ,C _s ,C _s ,MWD,OC, CaCO ₃ ,CEC

* P_c: تنش پیش تراکمی، C_s: شاخص تراکم، C_s: شاخص تورم، Si/S: نسبت لای به شن، Clay: رس، MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه-ها، OC: کربن آلی، CEC: گنجایش تبادل کاتیونی، CaCO₃: کربنات کلسیم، LLWR_p: دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (محاسبه شده به‌طور غیرمستقیم از 7 تابع ایجاد شده برای حدود رطوبتی).

نتیجه‌گیری

رطوبتی، موجب افزایش R و کاهش AIC شد. در واقع، حدود رطوبتی متأثر از بافت، ساختمان خاک و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مختلف می‌باشند.

بر اساس یافته‌های به‌دست‌آمده از این پژوهش، استفاده هم‌زمان از پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و تراکم محصور در غالب مدل‌های رگرسیونی، برای برآورد حدود

برآورد مستقیم LLWR (داده‌ها گزارش نشده‌اند)، از دقت بالاتری برخوردار بود. در میان مدل‌های مختلف، مدل‌های شماره 3، 5 و 7 بالاترین دقت تخمین را نسبت به مدل‌های دیگر داشتند و می‌توانند بر اساس در دسترس بودن متغیرهای ورودی برای تخمین حدود رطوبتی و محاسبه غیرمستقیم دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت توسط کاربران استفاده شوند. البته تعمیم‌پذیری این نتایج مستلزم بررسی بر روی تعداد نمونه‌ها و مدل‌های بیشتر است.

همچنین، نتایج نشان داد که LLWR ممکن است به‌طور رضایت‌بخش و غیرمستقیم، به‌جای تعیین آن از داده‌های آزمایشگاهی که زمان‌بر و پرهزینه است، با استفاده از خصوصیات اندازه‌گیری شده موجود خاک و یا از داده‌های سهل‌الوصول خاک محاسبه شود. چراکه اندازه‌گیری منحنی تراکم محصور و خصوصیات فیزیکی - شیمیایی استفاده‌شده به‌عنوان تخمین‌گر در این پژوهش به‌طور نسبی سریع و کم‌هزینه است. همچنین، محاسبه LLWR با استفاده از چهار حد رطوبتی θ_{FC} ، θ_{PWP} ، θ_{AFP} و θ_{SR} که از طریق توابع انتقالی تخمین زده‌شده‌اند، در مقایسه با

فهرست منابع:

1. آریان پور، ح. و شرفا، م. 1392. تأثیر کشت بر رطوبت قابل‌دسترس خاک در بافت‌های مختلف با استفاده از توزیع خلل و فرج. مجله الکترونیک مدیریت خاک و تولید پایدار، جلد سوم، شماره یک، صفحه 131-148.
2. ابراهیمی، ع.، بیات، ح.، صادقی، س.، فلاح، م.، جره، م. و زنگنه، م. 1395. استفاده از خصوصیات منحنی تراکم خاک برای تخمین رطوبت خاک با استفاده از مدل ونگنوختن. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، جلد 47، شماره 2، صفحه 217 تا 228.
3. حیدری، ل.، بیات، ح. و ابراهیم زاده، گ. 1395. بررسی رابطه بین منحنی تراکم محصور و دامنه رطوبتی با کمترین محدودیت. مجله دانش آب و خاک، جلد 26، شماره 4/2، صفحه 243 تا 256.
4. فیضی دولت آبادی، پ. 1389. اثر مدیریت زراعی و بافت خاک بر دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا.
5. کاظمی، ز. 1388. اثر سیمانی‌کننده‌ها بر دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت در خاک با استفاده از توابع انتقالی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز.
6. نصرتی میان‌دوآب، الف. 1386. تعیین دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت و بررسی عوامل مؤثر بر آن در برخی از خاک‌های هم‌مدان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا.
7. Ajayi, A.E., Dias Junior, M.S., Curi, N., Gontijo, I., Araujo Junior, C.F. and A.V. India Junior. 2009. Relation of strength and mineralogical attributes in Brazilian latosols. Soil Tillage Res. 102, 14-18.
8. Akaike, H. 1974. A new look at the statistical model identification. IEEE Transactions on Automatic Control. 19:716-723.
9. An, S., Mentler, A., Mayer, H. and W.E.H. Blumc. 2010. Soil aggravation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China. Catena. 81:226-233.
10. Annabi, M., Houot, H., Francou, F., Poitrenaud, M., and Y. Le Bissonnais. 2007. Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities. Soil Sci Society Am J. 71: 413-423.
11. Baumgartl, T. and B. Koeck. 2004. Modeling volume change and mechanical properties with hydraulic models. Soil Science Society of America Journal, 68: 57-65.

12. Bayat, H., Ebrahimi, I., Rastgo, M., Zare abyaneh, H. and N. Davatghar. 2013. Fitting Different Soil Water Characteristic Curve Models on the Experimental Data of Various Textural Classes of Guilan Province Soils. *Water and Soil Science*, 23 (3):151-167.
13. Bengough, A.G., Campbell, D.J., and M.F. O'Sullivan. 2001.p.638. In Smith, K.A. and Mullins, C.E. (Eds.), *Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. Soil and Environmental Analysis*. Marcel Dekker, Inc., New York.
14. Boujila, A. and T. Gallai. 2008. Soil organic carbon fraction and aggregate stability in carbonated and no carbonated soils in Tunisia. *Journal of Agronomy*, 7: 127-137.
15. Botula, Y.D., Cornelis, W. M., Baert, G., and E. Van Ranst. 2012. Evaluation of function for predicting water retention of soils in Lower Congo (*D.R.Congo*). *Agricultural Water Management*, 111,1-12.
16. Bower, CA., Reitemeier, R. and M. Fireman. 1952. Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Science*, 73: 251-262.
17. Braidá, J.A., Reichert, J.M., Veiga, M.D. and D.J. Reinert. 2006. Mulch and soil organic carbon content and their relationship with the maximum soil density obtained in the proctor test. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30: 605-614.
18. Busscher, W. 1990. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 33: 519-524.
19. Casagrande, A. 1936. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. P. 60-64. *Proceedings of the international conference on soil mechanics and foundation engineering: Harvard University Cambridge*.
20. Clement, C. 1966. A simple and reliable tension table. *Journal of Soil Science*. 17(1): 133-135.
21. Da Silva, AP., and B. Kay. 1997. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Science Society of America Journal*, 61: 877-883.
22. Da Silva, A. P. and B. Kay. 1996. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. *Plant and Soil*, 184(2): 323-329.
23. Da Silva, A., Kay, B., and E. Perfect. 1994. Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58:1775-1781.
24. Dawidowski, J.B. and A.J. Koolen. 1994. Computerized determination of the preconsolidation stress in compaction testing of field core samples, *Soil & Tillage Research*, 31: 277-282.
25. Dexter, A.R., Czyz, E.A., and O.P. Gate. 2004. Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of subsoils. *Soil and Tillage Research*, 79: 185 – 189.
26. Gee, G. W., and Or, D. 2002. Particle-size analysis. p. 255-293. In Dane, J. H. and Topp, G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 4- Physical Methods*. Agronomy Monograph (vol. 9). ASA and SSA, Madison, WI.
27. Gompertz, B. 1825. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, 115: 513-583.
28. Hazelton, P.A. and B.W. Murphy. 2007. *Interpreting soil test results: what do all the numbers mean?*. CSIRO publishing.
29. Imhoff, S., Da Silva, A.P. and D. Fallow. 2004. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. *Soil Science Society of America Journal*, 68(1):17-24.

30. Kay, B., Hajabbasi, M., Ying, J. and M. Tollenaar. 2006. Optimum versus non-limiting water contents for root growth, biomass accumulation, gas exchange and the rate of development of maize (*Zea mays* L.). *Soil and Tillage Research*, 88(1): 42-54.
31. Keller, T., Lamandé, M., Schjønning, P., and A.R. Dexter. 2011. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. *Geoderma*, 163: 13-23
32. Keller, T. and J. Arvidsson. 2007. Compressive properties of some Swedish and Danish structured agricultural soils measured in uniaxial compression tests. *European Journal of Soil Science*, 58: 1373-1381.
33. Keller, T., Arvidsson, J., Dawidowski, J.B. and Koolen, A.J., 2004. Soil precompression stress. II. A comparison of different compaction tests and stress-displacement behavior of the soil during wheeling. *Soil Tillage Res.* 77: 97-108.
34. Klute, A. 1986. Water retention: laboratory methods. *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods*, 635-662.
35. Mosaddeghi, M.R. and Mahboubi, A.A. 2011. Point pedotransfer functions for prediction of water retention of selected soil series in a semi-arid region of western Iran. *Archives of Agron and Soil Sci.* 57: 327-342.
36. Mosaddeghi, M., Hemmat, A., Hajabbasi, M., and A. Alexandrou. 2003. Pre-compression stress and its relation with the physical and mechanical properties of a structurally unstable soil in central Iran. *Soil and Tillage Research*, 70: 53-64.
37. Nemes, A., Rawls, W.J. and Y.A. Pachepsky. (2005). "Influence of organic matter on the estimation of saturated hydraulic conductivity". *Soil Science Society of America Journal*, 69(4):1330-1337.
38. Neyshabouri, M.R., Kazemi, Z., Oustan, S. and M. Moghaddam. 2014. PTFs for predicting LLWR from various soil attributes including cementing agents. *Geoderma*, 226: 179-187.
39. Pirmoradian, N., Sepaskhah, A. and M. Hajabbasi. 2005. Application of fractal theory to quantify soil aggregate stability as influenced by tillage treatments. *Biosystems Engineering*, 90: 227-234.
40. Reinert Dalvan, J., Wolkowski Richard, P., Birl, L. and J. Arriaga Francisco. 2002. Compaction effects on least limiting water range and plant growth. In 17. World Congress of Soil Science, Bangkok (Thailand). 14-21 Aug 2002.
41. Silva, G.L., Lima, H.V., Campanha, M.M, Gilkes, R.J. and T.S. Oliveira. 2011. Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. *Geoderma*, 167: 61-70.
42. Sims, J.T. 1996. Lime requirement. P. 491-515. In: Sparks, D.L. Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T. and Sumner, M.E. (Eds.), *Methods of soil analysis, Part 3- Chemical methods*. ASA/SSSA Madison, Wisconsin, USA.
43. Tang, AM., Cui, YJ., Eslami, J. and P. Défossez. 2009. Analysing the form of the confined uniaxial compression curve of various soils. *Geoderma*, 148: 282-290.
44. Walkley. A. and IA. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37: 29-38.
45. Yoder, R.E. 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Agronomy Journal*, 28(5): 337-351.
46. Zou, G., Sands, R., Buchan, G. and Hudson, I. 2000. Least limiting water range: A potential indicator of soil physical quality of forest soil. *Aust. J. Soil Res.* 38: 947-958.

Evaluation of the Regression Pedotransfer Functions Using Physical, Mechanical, and Chemical Soil Properties in the Estimation of the Least Limiting Water Range (LLWR)

H. Bayat¹, L. Heydari, and G. Ebrahim Zadeh

Associate Professor., Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Bu Ali Sina University, Hamadan, Iran; E-mail: h.bayat@basu.ac.ir

M. Sc. Students of Soil Science, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran; E-mail: heydarii1370@gmail.com

Former M. Sc. Student of Soil Science, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran; E-mail: ebrahimzade.golnaz@gmail.com

Received: November, 2016 and Accepted: October, 2017

Abstract

Least limiting water range (LLWR) is one of the physical and qualitative soil characteristics with difficult, costly, and time-consuming measurement. The objective of this study was to estimate the LLWR using easy to measure soil properties by regression method. In this study, 192 soil samples were taken from 24 locations of West Azarbaijan province and soil water retention curve, soil penetration resistance curve, and confined compression curve were measured. To estimate the four moisture criteria of LLWR (θ_{FC} , θ_{PWP} , θ_{AFP} and θ_{SR}), the soil basic properties (clay content and silt to sand ratio) were used as inputs and the basic model was developed. Then, the confined compression curve parameters only and along with the physico-chemical properties at different levels were added to the previous inputs and 7 pedotransfer functions (PTF) were developed. By entering parameters of confined compression solely and along with different physico-chemical properties in the second and third steps, respectively, for estimating the moisture criteria of the LLWR and calculating LLWR, root mean square error and Akaike's information criterion decreased significantly. The R values calculated for PTFs showed that the use of PTF₃, PTF₅ and PTF₇ instead of PTF₁ improved the estimation of the moisture criteria considerably (R values were equal to 0.70, 0.73, and 0.77, for PTF₃, PTF₅, and PTF₇, respectively, in contrast to the 0.39 for PTF₁). So, the moisture criteria of LLWR can be estimated with acceptable accuracy (R=0.77 and AIC= -154.31) using confined compression parameters as estimators.

Keywords: Confined compression, Soil resistance characteristic curve, Soil moisture characteristic curve.

¹ Corresponding author: Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran.