نشریه دانش آب و خاک / جلد ۲۶ شماره ۴/۲ صفحه‌های ۲۴۳ تا ۲۵۶ / سال ۱۳۹۵

بررسی رابطه بین منحنی تراکم محصور و دامنه رطوبتی با کمترین محدودیت

لادن حیدری[۱]، حسین بیات[۲]*، گلناز ابراهیم زاده[۳]

تاریخ دریافت: ۹٤/۰۸/۱۵ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۸/۰٤

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا- همدان
۲- دانشیار گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا- همدان
۳- دانشجوی پیشین کارشناسی ارشد گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا- همدان
*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: h.bayat@basu.ac.ir

چکیده

دامنه رطوبتی با کمترین محدودیت (LLWR) از خصوصیات مهم خاک و شناسه‌ای مناسب برای بررسی ساختمان خاک بوده که اندازه‌گیری آن مشکل، وقت‌گیر و پرهزینه است. مقاومت به تراکم خاک از جمله شاخص‌های نشان‌دهنده مواد آلی، بافت، ساختمان و سایر خصوصیات خاک می‌باشد که کنترل‌کننده تراکم و مؤلفه‌های آن و LLWR می‌باشند. بنابراین بین LLWR و منحنی تراکم همبستگی وجود دارد، که تاکنون بررسی نشده است. اندازه‌گیری منحنی تراکم محصور به‌طور نسبی سریع و ساده است، بنابراین می‌توان از پارامترهای آن برای برآورد LLWR استفاده کرد. در این تحقیق ۲٤ نمونه خاک دست‌خورده و دست‌نخورده از استان آذربایجان غربی جمع‌آوری و منحنی‌های نگهداری آب خاک، منحنی‌های مشخصه مقاومت خاک و تراکم محصور آن‌ها تعیین شدند. از بین مشخصه‌های خاک، نسبت سیلت به شن و مقادیر رس، کربن آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی، کربنات کلسیم، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و پارامترهای تراکم محصور برای برآورد LLWR استفاده گردید. توانایی هریک از متغیرهای ورودی از جمله خصوصیات تراکم محصور، در بهبود تخمین LLWRبه کمک مدل‌های رگرسیونی ارزیابی شد. استفاده از پارامترهای تراکم محصور سبب بهبود تخمین LLWR گردید، چرا که بسیاری از ویژگی‌های مؤثر بر تراکم محصور همان ویژگی‌های تعیین‌کننده LLWR می‌باشند. مقادیر ضریب بهبود نسبی (*RI*) محاسبه شده برای توابع انتقالی خاک (PTF)ها در مکش ٦۰ سانتی‌متر برای PTF_2، PTF_5 و PTF_7 به‌ترتیب ۱۱/۵، ۱۹/۷ و ۲۸/۵۳ درصد بود که نشان داد استفاده از خصوصیات منحنی تراکم محصور و سایر ویژگی‌ها به عنوان برآوردگر موجب بهبود قابل توجه تخمین‌ها شد. بنابراین می‌توان LLWR را با دقت قابل قبولی (R^2=۰/٥٤) با استفاده از پارامترهای منحنی تراکم تخمین زد.

واژه‌های کلیدی: تخمین، تراکم محصور، توابع انتقالی، دامنه رطوبتی با کمترین محدودیت، رطوبت خاک

Investigating the Relationship between Confined Compression Curve and Least Limiting Water Range

L Heydari[1], H Bayat[2]*, G Ebrahim Zade[3]

Received: 06 November 2015 Accepted: 25 October 2016
[1] M.Sc. Student, Dept. of Soil Science, Faculty of Agric., Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran
[2] Assoc. Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agric., Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran
[3] Former M.Sc. Student, Dept. of Soil Science, Faculty of Agric., Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran
*Corresponding Author, Email: h.bayat@basu.ac.ir

Abstract

Least limiting water range (LLWR) is one of the important characteristics of the soil and is a soil structure identifier with difficult, costly and time-consuming measurement. Resistance to soil compaction is an index of soil organic matter, texture, structure and other properties which controls, the compression and its components and LLWR. So there is a correlation between the LLWR and compression curve, which has not been investigated so far. Since, the measurement of the confined compression curve is relatively quick and simple, therefore it can be used to estimate the LLWR. In this study, 24 disturbed and undisturbed soil samples were taken from West Azarbayjan and their soil water retention curves, soil penetration resistance curves and confined compression curves were determined. The ratio of silt to sand, the clay content, organic carbon, cation exchange capacity, calcium carbonate, aggregates mean weight diameter and confined compression parameters were used to estimate LLWR. The ability of each of the input variables, including confined compression characteristics, in improving the estimation of LLWR using regression models was evaluated. Using the confined compression parameters improved the estimation of the LLWR, significantly. Because, many characteristics affecting the confined compression are the same ones determining the LLWR. Relative improvement (*RI*) values were calculated for pedotransfer functions (PTFs) in suction 60 cm were 11.5, 19.7 and 28.53 % for PTF_2, PTF_5 and PTF_7, respectively which showed considerable improvements in the estimation of LLWR by using confined compression and other properties as predictors. So, LLWR can be estimated with acceptable accuracy (R^2=0.54) using confined compression parameters as estimators.

Keywords: Confined compression, Estimation, Least limiting water range, Pedotransfer functions, Soil water

مقدمه

دامنه رطوبتی با کمترین محدودیت (LLWR)[1]، دامنه‌ای از مقدار رطوبت خاک است که در آن رشد گیاه در ارتباط با تهویه، مقاومت فروروی خاک و مکش آب خاک با کمترین محدودیت مواجه بوده و در خارج از این دامنه، محدودیت‌ها از نظر دسترسی گیاه به آب افزایش می‌یابد (داسیلوا و همکاران ۱۹۹٤).

LLWR شاخص مفیدی برای ارزیابی کیفیت ساختمان خاک، بررسی تأثیر سیستم‌های مدیریتی و خاک‌ورزی در مقیاس مزرعه‌ای، تولید محصول بالقوه و

[1] .Least limiting water range

برنامه‌ریزی‌های آبیاری است (بنجامین و همکاران ۲۰۰۳). دامنه رطوبتی با کمترین محدودیت براساس چهار ضریب رطوبتی شامل مقدار رطوبت در ظرفیت زراعی [۲](θ_{FC})، نقطه پژمردگی دائم [۳](θ_{PWP})، تخلخل تهویه‌ای ۱۰ درصد [۴](θ_{AFP}) و مقاومت فروروی دو مگاپاسکال [۵](θ_{SR}) محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه به‌دست آوردن منحنی نگهداری آب خاک با روش‌های مستقیم آزمایشگاهی زمان‌بر و پرهزینه است (کمپل و شیوزاوا ۱۹۹٤) و به‌دلیل تغییر پذیری بالای مقاومت فروروی، به‌دست آوردن مقادیر دقیق آن دشوار است (وز و همکاران ۲۰۰۱)، بنابراین بسته به اهمیت LLWR و دشواری‌های اندازه‌گیری آن و از آنجایی که اندازه‌گیری این پارامتر، کاری زمان‌بر و سخت است به‌همین علت روش‌های غیر مستقیم در تخمین LLWR ترجیح داده می‌شوند.

توابع انتقالی برای توصیف معادله‌هایی به‌کار می‌روند که وابستگی ویژگی‌های دیریافت خاک مانند LLWR با متغیرهای زودیافت خاک مانند بافت، ساختمان، جرم مخصوص ظاهری و میزان مواد آلی را نشان می‌دهند (وستن و همکاران ۲۰۰۱). داسیلوا و کی (۱۹۹۷) از توابع انتقالی برای برآورد LLWR استفاده کردند.

ویژگی‌های مکانیکی خاک، حدود تنش مجاز برای جلوگیری از تراکم خاک یعنی تنش پیش‌تراکمی و همچنین شاخص فشردگی را مشخص می‌کنند. پارامترهایی که به‌طور گسترده برای اندازه‌گیری تراکم خاک استفاده می‌شوند شامل جرم مخصوص ظاهری خاک (هاکانسون و همکاران ۱۹۸۸)، نسبت پوکی (کولن ۱۹۷٤) و تنش پیش‌تراکمی (هورن ۱۹۸۱) می‌باشند. برای نمایش تراکم خاک از منحنی لگاریتم تنش در مقابل نسبت پوکی استفاده می‌شود. این منحنی شامل دو ناحیه مجزا است که رفتار الاستیک در تنش‌های پایین-خط تراکم مجدد یا تورم و رفتار پلاستیک در مکش‌های بالاتر -خط فشردگی بکر را نشان می‌دهد. بامگارتل و کوخ (۲۰۰٤) گزارش کردند که معمولا قدر مطلق شیب خط فشردگی بکر، شاخص فشردگی [۶](C_c) و قدر مطلق شیب خط تراکم مجدد، شاخص تورم [۷](C_s) نام دارد و نقطه انتقال بین منحنی برگشتی الاستیک و منحنی فشردگی بکر به‌عنوان تنش پیش‌تراکمی [۸](P_c) شناخته می‌شود.

ساختمان خاک، منافذ و مقدار مکش خاک بر تراکم محصور [۹] و مؤلفه‌های آن یعنی تنش پیش‌تراکمی، شاخص تراکم و شاخص تورم تأثیر می‌گذارند. تنش پیش‌تراکمی با جرم مخصوص ظاهری همبستگی مثبت و معنی‌داری دارد (الکساندر و ارل ۱۹۹۸). در نتیجه با توجه به عوامل مؤثر بر پارامترهای تراکم محصور مانند مقاومت فروروی، جرم مخصوص ظاهری، تخلخل و مکش آب خاک می‌توان این موضوع را دریافت که بسیاری از ویژگی‌های مؤثر بر تراکم محصور همان ویژگی‌ها و عوامل تعیین‌کننده و تأثیرگذار بر LLWR می‌باشند. نفوذپذیری، تخلخل، جرم مخصوص ظاهری و مقاومت فروروی خاک از عوامل کنترل‌کننده LLWR هستند (داسیلوا و همکاران ۱۹۹٤). دامنه رطوبتی با کمترین محدودیت نیز با جرم مخصوص ظاهری رابطه عکس دارد (داسیلوا و کی ۱۹۹۷). منحنی تراکم محصور و LLWR (منحنی مشخصه مقاومت خاک و منحنی نگهداری آب خاک) وابستگی شدیدی به توزیع اندازه منافذ و ساختمان خاک دارند. دکستر و همکاران (۲۰۰۸) بیان کردند که منحنی نگهداری آب خاک (SWRC)[۱۰] با ساختمان خاک ارتباط دارد. در همین راستا سوان و ون اورکرک (۱۹۹٤) نیز گزارش کردند که منحنی تراکم تابعی از ساختمان خاک است. پس این فرضیه مطرح می‌شود

[2] .Water content at field capacity
[3] .Water content at permanent wilting point
[4] . Air-filled porosity
[5] . Water content at 2 MPa penetration resistance
[6] .Compression index
[7] .Swelling index
[8] .Pre-compaction stress
[9] .Confined compression
[10] .Soil water retention curve

که مقدار LLWR خاک را می‌توان از پارامترهای تراکم محصور پیش‌بینی کرد.

توابع انتقالی متعددی برای برآورد LLWR ایجاد شده است. داسیلوا و کی (۱۹۹۷) اثر خصوصیات خاک مانند مقدار ماده آلی، درصد رس و جرم مخصوص ظاهری بر LLWR را از طریق ایجاد توابع انتقالی برای منحنی نگهداری آب خاک و منحنی مشخصه مقاومت خاک بررسی کردند.

بر پایه بررسی انجام شده از منابع داخلی و خارجی در هیچ تحقیقی از پارامترهای تراکم محصور در مکش‌های مختلف و در قالب مدل‌های رگرسیونی برای تخمین مستقیم LLWR استفاده نشده است. بنابراین هدف از این پژوهش بررسی اندازه بهبود صحت برآورد مستقیم LLWR در اثر استفاده از ویژگی‌های فیزیکو-شیمیایی متعدد خاک و پارامترهای تراکم محصور در مکش‌های مختلف، به‌عنوان تخمین‌گر در مدل‌های رگرسیونی بود.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و خصوصیات خاک‌ها

برای انجام این پژوهش نمونه‌برداری از ۲۴ منطقه مختلف از استان آذربایجان غربی بر اساس سری خاک-های غالب صورت گرفت. نمونه‌های دست‌نخورده (۸ سیلندر از هر محل نمونه‌برداری) با استفاده از سیلندرهای استیل به‌قطر ۵/۳ و ارتفاع ۴/۵ سانتی‌متر (در مجموع ۱۹۲ سیلندر) برای تعیین منحنی نگهداری آب خاک، منحنی مشخصه مقاومت خاک، جرم مخصوص ظاهری خاک و منحنی تراکم محصور جمع‌آوری شدند. بافت خاک به‌روش هیدرومتر (گی و ار ۲۰۰۲)، کربنات کلسیم معادل به‌روش تیتراسیون (سیمیس ۱۹۹۶)، ظرفیت تبادل کاتیونی با استفاده از استات آمونیوم (باور و همکاران ۱۹۵۲)، مقدار کربن آلی با استفاده از روش والکی بلاک (۱۹۳۴) و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به-روش یودر (۱۹۳۶) اندازه‌گیری شدند.

منحنی نگهداری آب خاک (SWRC)

برای تعیین منحنی نگهداری آب خاک، ابتدا نمونه-های دست‌نخورده به‌مدت ۲۴ ساعت از زیر اشباع شدند. سپس مقدار رطوبت خاک در مکش‌های ماتریک صفر، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۱۰۰، ۳۰۰، ۱۰۰۰، ۴۰۰۰، ۸۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر تعیین گردید. بدین‌ترتیب‌که هرکدام از ۸ سیلندر برداشت شده از هر محل در یکی از مکش‌های مذکور به تعادل رسید. برای اندازه‌گیری θ_{FC} و θ_{PWP} مدل نمایی پیشنهاد شده توسط داسیلوا و همکاران (۱۹۹۴) بر داده‌های آزمایشگاهی منحنی نگهداری آب خاک برازش گردید.

$$\theta = \exp(\alpha + \beta D_b)\psi^{\delta} \qquad [1]$$

در رابطه فوق ψ مکش (cm)، θ رطوبت حجمی خاک ($cm^3\ cm^{-3}$)، D_b جرم مخصوص ظاهری (gcm^{-3}) و α، β و δ پارامترهای مدل هستند. رطوبت ظرفیت مزرعه در مکش ماتریک ۱۰۰ سانتی‌متر (هایز و همکاران ۱۹۵۵) و رطوبت در نقطه پژمردگی در مکش ماتریک ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر (ریچاردز و ویور ۱۹۴۳) در نظر گرفته شد. برازش داده‌ها از طریق نرم‌افزارSPSS صورت گرفت.

منحنی مشخصه مقاومت خاک[11] (SSCC)

مقاومت فروروی خاک در نمونه‌های دست‌نخورده پس از ایجاد تعادل در مکش‌های ماتریک ۴۰، ۶۰، ۱۰۰، ۳۰۰، ۱۰۰۰، ۴۰۰۰، ۸۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی-متر با استفاده از دستگاه تک‌محوری با قطر قاعده مخروط ریز فروسنج ۲/۵ میلی‌متر، زاویه مخروط ۳۰ درجه و با سرعت فروروی $2mm\ min^{-1}$ اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری نیرو در آزمون مقاومت فروروی با استفاده از رینگ ۱ کیلونیوتون و در دو نقطه و در هر نقطه در ۶ عمق (۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و۳ سانتی‌متر) انجام شد. میانگین ۱۲ نیروی قرائت‌شده تقسیم بر مساحت قاعده

[11] .Soil strength characteristic curve

مخروط به‌عنوان مقاومت فروروی برای ان نمونه در نظر گرفته شد.

مقادیر مقاومت فروروی در برابر رطوبت و جرم مخصوص ظاهری با استفاده از مدل بوسچر (۱۹۹۰) تعیین شد.

$$SR = d\theta^{e} D_b^{f} \qquad [۲]$$

در روابط فوق SR[12] مقاومت فروروی خاک (MPa)، θ رطوبت حجمی خاک (cm^3cm^{-3})، D_b جرم مخصوص ظاهری خاک (gcm^{-3}) و d، e و f ضرایب مدل هستند. فرمول ۲ با استفاده از نرم‌افزار SPSS بر داده‌های تجربی برازش شد و ضرایب مدل به‌دست آمدند. پس از تعیین ضرایب مدل با قرار دادن عدد ۲ مگاپاسکال به عنوان مقدار مقاومت فروروی خاک (تیلور و همکاران ۱۹٦٦) به‌جای SR و با داشتن جرم مخصوص ظاهری هر استوانه رطوبت خاک در مقاومت فروروی ۲ مگاپاسکال محاسبه شد. رطوبت معادل تخلخل تهویه‌ای ۱۰ درصد از رابطه زیر محاسبه شد (کی و همکاران ۲۰۰٦).

$$\theta_{AFP} = \theta_S - 0.1 = (1 - D_b / D_S) - 0.1 \qquad [۳]$$

در روابط فوق θ_S مقدار رطوبت اشباع (cm^3cm^{-3}) و D_s جرم مخصوص حقیقی (gcm^{-3}) می‌باشند. LLWR تفاضل بین دو حد رطوبتی بالا و پایین است. حد بالایی آن رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای (θ_{FC}) یا رطوبت در تخلخل تهویه‌ای ۱۰ درصد (θ_{AFP}) هر کدام که کمتر باشد و حد پایینی آن رطوبت در نقطه پژمردگی دایم (θ_{PWP}) یا رطوبت در مقاومت فروروی دو مگاپاسکال (θ_{SR}) هر کدام که بیشتر باشد (داسیلوا و همکاران ۱۹۹٤).

منحنی تراکم محصور

برای انجام آزمایش تراکم محصور از دستگاه تک‌محوری[13] (CBR) استفاده گردید. برای این آزمایش از نمونه‌های دست‌نخورده که از دستگاه صفحات فشاری در مکش‌های ٤۰، ٦۰، ۱۰۰، ۱۰۰۰، ۸۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر خارج و رطوبت آن تعیین شده بود بهره‌گیری گردید. اعمال بار نمونه توسط پیستون دستگاه CBR، با نرخ بار گذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. در هنگام بارگذاری ۱۰۰ قرائت با فواصل ۰/۰۱ میلی‌متری انجام شد. منحنی تراکم محصور با رسم نسبت پوکی در برابر لگاریتم تنش عمودی به‌دست آمد.

مدل گمپرتز (۱۸۲۵) (معادله ٤) با استفاده از نرم‌افزار Solver Excel 2010 بر داده‌های بارگذاری منحنی تراکم محصور برازش شد و پارامترهای a، b، c و m به‌دست آمدند (کلر و همکاران ۲۰۱۱). با بهره‌گیری از پارامترهای مدل گمپرتز (۱۸۲۵)، شاخص تراکم با معادله ٥ و شاخص تورم با معادله ٦ محاسبه شد. تنش پیش‌تراکمی با روش گرافیکی کاساگراند (۱۹۳٦) به‌دست آمد.

$$e = a + c\exp\left\{-\exp\left[b\left(\log\sigma - m\right)\right]\right\} \qquad [٤]$$

در معادله فوق a، b، c و m پارامترهای برازشی هستند. e بیان‌گر نسبت پوکی (cm^3cm^{-3}) و σ نیز بیان‌گر تنش (kPa) است. چهار ضریب مدل گمپرتز (۱۸۲۵) (معادله ٤) توسط بهینه‌سازی از طریق نرم‌افزار Solver Excel 2010 به‌دست آمدند. یعنی مدل گمپرتز با استفاده از نرم‌افزار Solver Excel 2010 بر داده‌های بارگذاری منحنی تراکم محصور برازش شد و پارامترهای a، b، c و m به‌دست آمدند.

$$C_c = \frac{bc}{\exp(1)} \qquad [٥]$$

$$C_{sLoadin-25kPa} = \frac{e_0 - e_{25kPa}}{\log\left(25kPa\right)} \qquad [٦]$$

در معادلات بالا C_c، شاخص تراکم؛ C_S، شاخص تورم؛ b و c ضرایب مدل گمپرتز؛ e_0، نسبت پوکی اولیه و $e_{25\ kPa}$ بیان‌گر نسبت پوکی در حالتی که به نمونه ۲۵ کیلوپاسکال تنش وارد شده است.

[12] .Soil resistance

[13] .California bearing ratio

گام‌های ساخت توابع

در این تحقیق توابع انتقالی به‌روش رگرسیونی برای برآورد LLWR ایجاد شدند. در این پژوهش از مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه برای اشتقاق PTFهای LLWR استفاده شد. مدل رگرسیونی با دو متغیر ورودی نسبت سیلت به شن و رس (PTF_1) به‌عنوان مدل پایه انتخاب شد. در همه‌ی مدل‌های اصلی برآورد کننده LLWR، این دو پارامتر یعنی نسبت سیلت به شن و رس به‌گونه‌ای ثابت حضور دارند. چرا که معروف‌ترین تخمین‌گرها در PTFها در روش‌های مختلف (رگرسیون، شبکه عصبی، مدیریت گروهی داده‌ها و غیره) اطلاعات بافتی می‌باشند (به نقل از هاز ۱۹۶۷). از سوی دیگر اطلاعات بافتی به سادگی قابل اندازه‌گیری بوده و یا در دسترس می‌باشند. بنابراین در سطح اول از سیلت به شن و رس به‌عنوان تخمین‌گر استفاده و سایر سطوح با آن مقایسه شدند.

نحوه انتخاب پارامترهای تراکم در مکش‌های مختلف به این گونه بود که از پارامترهای تراکم محصور در مکش‌های ۴۰، ۶۰، ۱۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰۰، ۸۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر برای تخمین LLWR استفاده شد. سپس از بین پارامترهای تراکم محصور در مکش‌های مختلف، مکش‌هایی که با بالاترین R^2 و کمترین $RMSE$، LLWR را تخمین زده بودند در نظر گرفته شدند. بنابراین در این پژوهش از پارامترهای تراکم محصور در مکش‌های ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر به‌عنوان تخمین‌گر استفاده گردید. بر پایه ترکیبات متفاوت از متغیرهای ورودی ۷ مدل اصلی برای برآورد LLWR تشکیل شد (جدول۲). دو بار هم تمام توابع ۲ تا ۷ تکرار شد با این تفاوت که پارامترهای تراکم محصور در مکش‌های ۶۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر به‌جای پارامترهای تراکم محصور در مکش ۴۰ سانتی‌متر به‌عنوان تخمین‌گر استفاده شدند. چرا که خصوصیات مکانیکی خاک تحت تأثیر شرایط رطوبتی قرار می‌گیرند (هورن و همکاران ۱۹۹۸). همچنین ساختمان خاک در شرایط رطوبتی متفاوت تأثیر متفاوتی را بر ویژگی‌های تراکم خاک و در نتیجه LLWR ایجاد می‌کند. در تمام توابع ایجادشده مشکل چند هم‌خطی از طریق فاکتور تورم واریانس [14] (VIF) کنترل گردید.

آماره‌های ارزیابی توابع انتقالی

برای بررسی دقت توابع انتقالی از آماره ریشه میانگین مربعات خطا [15]($RMSE$)، معیار اطلاعات آکایک [16](AIC) (آکایک ۱۹۷۴)، ضریب تبیین [17](R^2) و ضریب بهبود نسبی [18](RI) بهره‌گیری شد.

ریشه میانگین مربعات خطا، $RMSE$

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{1}^{N}(Y_i-Y_P)^2}{N}} \qquad [۷]$$

معیار اطلاعات آکایک، AIC

$$AIC=N\ln\left[\sum_{i=1}^{N}\frac{(Y_i-Y_P)^2}{N}\right]+2n_p \qquad [۸]$$

ضریب تبیین، R^2

$$R^2=\left[\frac{\left[N(\sum_{i=1}^{N}Y_iY_P)-\sum_{i=1}^{N}Y_i\sum_{i=1}^{N}Y_P\right]}{\sqrt{\left[\mathrm{N}(\sum_{i=1}^{N}Y_i^2)-(\sum_{i=1}^{N}Y_i)^2\right]\times\left[N(\sum_{i=1}^{N}Y_P^2)-(\sum_{i=1}^{N}Y_P)^2\right]}}\right]^2 \qquad [۹]$$

در روابط فوق n_p، تعداد متغیرهایی که باید تخمین زده شوند، N تعداد نمونه خاک، Y_i مقدار اندازه‌گیری‌شده LLWR و Y_P مقدار تخمین‌زده‌شده LLWR است. پارامتر R^2 بیان‌گر ارتباط خطی بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و تخمین‌زده‌شده است. مقادیر پایین و نزدیک به صفر $RMSE$ نشان‌دهنده دقت بالاتر و بهتر بودن آن مدل است.

روش مقایسه با بهره‌گیری از آماره آکایک به این صورت است که نخست یکی از مدل‌ها به‌عنوان مدل پایه گزینش می‌شود و مدل‌های دیگر نسبت به آن سنجیده می‌شوند. هرچه AIC کوچک‌تر باشد کیفیت برازش بالاتر است. ضریب بهبود نسبی از رابطه زیر تعیین شد.

[14] .Variance inflation factor
[15] .Root mean square error
[16] .Akaike information criterion
[17] .Coefficient of determination
[18] .Relative improvement

$$RI = \frac{RMSE_{1} - RMSE_{i}}{RMSE_{1}} \times 100 \quad [10]$$

در فرمول فوق $RMSE_1$: ریشه دوم میانگین مربعات خطای مدل ۱ و $RMSE_i$: ریشه دوم میانگین مربعات خطای مدل فرضی i که با مدل ۱ مقایسه می‌شود.

RI میزان برتری نسبی مدل i را نسبت به مدل یک نشان می‌دهد. دامنه تغییرات RI بین ۰ تا ۱۰۰ است (البته درصورتی‌که خطای مدل i نسبت به مدل یک کمتر باشد، در غیر این‌صورت منفی خواهد شد).

نتایج و بحث

ویژگی‌های آماری

ویژگی آماری کلیه متغیرهای مورد استفاده در این پژوهش در جدول شماره ۱ نشان داده شده است. این جدول شامل تمام پارامترهایی است که برای تخمین LLWR استفاده شدند. ۲٤ خاک مورد آزمایش در این پژوهش در چهار کلاس بافتی: لوم (۹ نمونه)، شنی لومی (۱نمونه)، لوم شنی (۷ نمونه) و لوم سیلتی (۷ نمونه) قرار گرفتند.

جدول ۱- ویژگی‌های آماری متغیرهای مورد استفاده در این تحقیق.

مکش (cm)	پارامتر	انحراف			مکش (cm)	پارامتر	انحراف		
		میانگین	استاندارد	کمینه	بیشینه		میانگین	استاندارد	کمینه	بیشینه
	P_c[a]	۲۳۵	۸٤/۲۳	۱۰٤	٤۲٦	P_c	۲۱٤	۱۱۰/٤٥	٦۳	٤۷۸
٤۰	C_c	۰/٤۱	۰/۱٦	۰/۰۹	۰/۹۸	C_c	۰/٥۲	۰/۱٦	۰/۱۰	۱/۰۰
	C_s	۰/۰۱	۰/۰۰۷	۰/۰۰	۰/۰٤	C_s	۰/۰۰۹	۰/۰۰٥	۰/۰۰	۰/۰۲
	P_c	۲۲٦	۲۹/۰٤	۱۷۰	۲۷٥	LLWR	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۰۰	۰/۳۰
٦۰	C_c	۰/٤۰	۰/۱٥	۰/۲	۰/۷	Cos(MWD, mm)	−۰/۱۰	۰/٥۷	−۱/۰۰	۰/۸۸
	C_s	۰/۰۰۹	۰/۰۰٥	۰/۰۰	۰/۰۲	OC (٪)	۱/۷۷	۰/٤۰	۱/۰۱	۲/۳۸
	Log (Clay,٪)	۱/۰۰	۰/۱۹	۰/٦۱	۱/٤۲	CEC (meq $100g^{-1}$)	۱۰/٥٤	٥/۸۹	۰/٦٥	۲۳/۷۰
	Si/S (٪)	۱/۱٥	۰/٦۸	۰/۱۷	۲/٦٤	$CaCO_3$ (٪)	۷/۲٥	۲/۱٥	٤/۰۳	۱٤/٤۳
SWRC	α	۳/٤۲	۱/۱٤	۱/۰۲	٥/٥٤	d	۱۲/۳۰	٤/۲۰	۱/۲٦	۲٤
	β	۰/۳۹	۰/۹۲	−۱/۰۸	۳/۰۲	e	−۱/٦۳	۱/۰۲	−٤/٦۹	−۰/٤۹
	δ	−۰/۱۷	۰/۱۷	−۰/۹۳	۰/۰٥	f	۲/۳٤	۲/۷۹	۰/۰٤	۱۲/۱۱

[a] P_c: تنش پیش‌تراکمی، 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، $CaCO_3$: کربنات کلسیم،SWRC: منحنی نگهداری آب خاک، α، β و δ: ضرایب منحنی نگهداری آب خاک مدل داسیلوا و همکاران (۱۹۹٤)، SSCC: منحنی مشخصه مقاومت خاک، d، e و f: ضرایب منحنی مشخصه مقاومت خاک مدل بوسچر (۱۹۹۰).

نتایج توابع انتقالی برآورد LLWR با روش گرسیون خطی

مقایسه آماره‌های ارزیابی مدل‌های ایجادشده در توابع ۲ تا ۷ با مدل پایه که در آن فقط از ویژگی‌های سیلت به شن و رس استفاده شده در جدول ۲ آورده شده است. در همه مدل‌ها افزودن پارامترهای تراکم محصور و پارامترهای دیگر اندازه R^2 و $RMSE$ را نسبت به مدل پایه بهبود بخشید و معیار RI برای همه مدل‌ها مثبت و بر پایه آماره AIC همه مدل‌ها دارای دقت بالاتری (معنی‌دار در سطح ۵ درصد) نسبت به مدل پایه بودند (جدول۲).

PTF_1: در گام نخست از ویژگی‌های پایه خاک (نسبت سیلت به شن و رس) به‌عنوان تخمین‌گر برای برآورد LLWR بهره‌گیری و به‌عنوان مدل پایه در این پژوهش انتخاب شد (جدول۲). در این مرحله پارامترهایی که به‌عنوان تخمین‌گر استفاده شدند در ارتباط با بافت

خاک هستند. PTF_1 نسبت به سایر PTFها دارای AIC بیشتر و R^2 کمتر بود (جدول۲). این نتایج نشان داد که تنها اطلاعات بافت خاک برای تخمین LLWR کافی نیست. هر دو عامل ساختمان و بافت خاک، تعیین‌کننده میزان فراهمی اکسیژن، رطوبت و همچنین درجه مقاومت فروروی خاک هستند، بنابراین این دو پارامتر (ساختمان و بافت خاک) با تأثیرگذاری بر حد بالا و پایین LLWR از عوامل تعیین‌کننده LLWR می‌باشند (داسیلوا و همکاران ۱۹۹٤). به‌همین علت استفاده از اطلاعات بافت خاک به‌تنهایی، منجر به تخمین دقیق LLWR نگردید.

PTF_2: در این مرحله تنش پیش‌تراکمی، شاخص تراکم و شاخص تورم به‌همراه ویژگی‌های پایه به‌عنوان برآوردگر وارد مدل شدند. افزودن این برآوردگرها موجب بهبود معنی‌دار دقت برآورد LLWR نسبت به مدل پایه گردید (جدول ۲). نمس و راولز (۲۰۰٦) بیان کردند که استفاده ترکیبی از خصوصیات بافتی و مکانیکی خاک در PTFها برای تخمین رطوبت به قرن بیست برمی‌گردد. یکی از دلایل تخمین مناسب توسط پارامترهای تراکم محصور همبستگی مناسب بین LLWR و ضرایب رطوبتی

با شاخص‌های برگرفته از منحنی تراکم (تنش پیش‌تراکمی، شاخص تراکم و شاخص تورم) است (داده‌ها نشان داده نشده است). کلر و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند که شاخص تورم و شاخص تراکم با مقدار کربن آلی و نسبت پوکی همبستگی مثبت دارند. LLWR هم تحت تأثیر مقدار کربن آلی و نسبت پوکی قرار می‌گیرد.

دامنه رطوبتی با کمترین محدودیت وابسته به بافت و ساختمان خاک است و هر عاملی که بر بافت و ساختمان خاک تأثیر بگذارد بر LLWR تأثیر می‌گذارد. همچنین تنش پیش‌تراکمی و شاخص تورم از پارامترهای مربوط به تراکم محصور و در ارتباط با جرم مخصوص ظاهری (بامگارتل و کوخ ۲۰۰٤) و سایر خصوصیات ساختمانی از جمله توزیع اندازه منافذ هستند. جرم مخصوص ظاهری معرف ساختمان خاک بوده و با LLWR رابطه عکس دارد (داسیلوا و کی ۱۹۹۷). بنابراین کنترل LLWRو تراکم محصور توسط ویژگی‌های مشابه یکی از عواملی بود که سبب گردید بهره‌گیری از پارامترهای تراکم محصور موجب بهبود برآورد LLWR گردد.

PTF_3: در PTF_3 از پارامترهای تراکم محصور در مکش‌های ٤۰، ٦۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر به‌همراه کربن آلی و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به‌عنوان برآوردگر برای LLWR بهره‌گیری شد. بهره‌گیری از این برآوردگرها سبب کاهش معنی‌دار AIC و افزایش R^2 نسبت به مدل پایه (جدول۲) و PTF_2 (جدول ۳) گردید.

تجدا و گونزالس (۲۰۰٦) گزارش کردند که با افزایش ماده آلی، مقدار هدایت الکتریکی محلول خاک افزایش یافت که در نتیجه آن، هماوری و تشکیل خاکدانه‌ها به‌صورت موقت بیشتر شده و منجر به بهبود وضعیت ساختمان خاک شد. مواد آلی دارای جرم مخصوص ظاهری کمتر و تخلخل بیشتری نسبت به مواد معدنی بوده و در نتیجه مخلوط کردن آن‌ها با خاک معدنی ممکن است جرم مخصوص ظاهری و تخلخل خاک را بهبود بخشیده (همزا و اندرسون ۲۰۰۵) و سبب افزایش LLWRگردد. همچنین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها شاخصی برای ارزیابی ساختمان خاک است (پیر مرادیان و همکاران ۲۰۰۵). LLWR نیز شاخصی برای ارزیابی ساختمان خاک بوده و تحت تأثیر ساختمان خاک است. بنابراین پایداری ساختمان خاک می‌تواند تحت تأثیر ماده آلی و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها قرار گیرد. ساختمان خاک با تأثیرگذاری بر مؤلفه‌هایی مانند تخلخل، جرم مخصوص ظاهری و مقاومت فروروی بر منحنی تراکم محصور و LLWR تأثیر می‌گذارد. به‌همین علت استفاده از میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و ماده آلی همراه با پارامترهای تراکم محصور به‌عنوان تخمین‌گر موجب بهبود تخمین LLWR گردید.

جدول۲- آماره‌های ارزیابی صحت برآورد PTFهای ایجادشده برای تخمین LLWR با استفاده از پارامترهای منحنی تراکم در مکش‌های مختلف.

مکش (cm)	PTF	R^2	*RMSE* (cm^3cm^{-3})	*AIC*	*RI* (%)	ورودی مدل
	PTF_1	۰/۰۰۹	۰/۰۶۹	-۱۲۶/۰۶		Si/S,Clay(%)
	PTF_2	۰/۲۴	۰/۰۶۱	-۱۳۲/۵۵	۱۲/۶	Si/S,Clay(%),P_c ,C_c,C_s
	PTF_3	۰/۳۲	۰/۰۵۷۴	-۱۳۵/۰۴	۱۷/۱	Si/S,Clay(%),P_c ,C_c,C_s ,MWD,OC
	PTF_4	۰/۲۷	۰/۰۵۹۶	-۱۳۳/۲۹	۱۴/۰	Si/S,Clay(%),P_c ,C_c,C_s ,$CaCO_3$
۴۰	PTF_5	۰/۳۹	۰/۰۵۴۶	-۱۳۷/۵۶	۲۷/۰	Si/S,Clay(%),P_c ,C_c,C_s ,MWD,OC,$CaCO_3$
	PTF_6	۰/۳۲	۰/۰۵۷۴	-۱۳۵/۰۸	۱۷/۱	Si/S,Clay(%),P_c ,C_c,C_s,CEC
	PTF_7	۰/۴۶	۰/۰۵۱۴	-۱۴۰/۴۴	۲۵/۹	Si/S,Clay(%),P_c ,C_c,C_s ,MWD,OC, $CaCO_3$,CEC
	PTF_1	۰/۰۰۹	۰/۰۶۹	-۱۲۶/۰۶		Si/S,Clay(%)
	PTF_2	۰/۲۲	۰/۰۶۱	−۱۳۲/۰۳	۱۱/۵	Si/S,Clay*(%)*,P_c ,C_c,C_s
	PTF_3	۰/۳۲	۰/۰۵۷۴	-۱۳۵/۱۱	۱۷/۲	Si/S,Clay(%),P_c ,C_c,C_s ,MWD,OC
	PTF_4	۰/۲۵	۰/۰۶۰۴	-۱۳۲/۶۶	۱۲/۸	Si/S,Clay(%),P_c ,C_c,C_s ,$CaCO_3$
۶۰	PTF_5	۰/۳۶	۰/۰۵۵۷	-۱۳۶/۶۱	۱۹/۷	Si/S,Clay(%),P_c ,C_c,C_s ,MWD,OC,$CaCO_3$
	PTF_6	۰/۳۵	۰/۰۵۵۹	-۱۳۶/۳۶	۱۹/۳	Si/S,Clay(%),P_c ,C_c,C_s,CEC
	PTF_7	۰/۴۹	۰/۰۴۹۵	-۱۴۲/۱۹	۲۸/۵۳	Si/S,Clay(%),P_c ,C_c,C_s ,MWD,OC, $CaCO_3$,CEC
	PTF_1	۰/۰۰۹	۰/۰۶۹	-۱۲۶/۰۶		Si/S,Clay(%)
	PTF_2	۰/۳۰	۰/۰۵۸	−۱۳۴/۲۸	۱۵/۷	Si/S,Clay(%),P_c ,C_c,C_s
	PTF_3	۰/۳۷	۰/۰۵۵۰	-۱۳۷/۰۲	۲۰/۶	Si/S,Clay(%),P_c ,C_c,C_s ,MWD,OC
۱۰۰	PTF_4	۰/۳۵	۰/۰۵۶۱	-۱۳۶/۲۶	۱۹/۱	Si/S,Clay(%),P_c ,C_c,C_s ,$CaCO_3$
	PTF_5	۰/۴۳	۰/۰۵۲۷	-۱۳۹/۲۲	۲۳/۹	Si/S,Clay(%),P_c ,C_c,C_s ,MWD,OC,$CaCO_3$
	PTF_6	۰/۳۸	۰/۰۵۵۱	-۱۳۷/۱۲	۲۰/۶	Si/S,Clay(%),P_c ,C_c,C_s,CEC
	PTF_7	۰/۵۴	۰/۰۴۷۳	-۱۴۴/۴۳	۳۱/۸	Si/S,Clay(%),P_c ,C_c,C_s ,MWD,OC, $CaCO_3$,CEC

جدول۳- مقایسه میانگین معیار اطلاعات آکایک PTFهای ایجادشده با استفاده از پارامترهای منحنی تراکم محصور در مکش-های مختلف با استفاده از آزمون دانکن در سطح ۵ درصد.

PTF	PTF_1	PTF_2	PTF_3	PTF_4	PTF_5	PTF_6	PTF_7
AIC	−۱۲۶$^{a\#}$	−۱۳۲^{b}	−۱۳۵^{c}	−۱۳۴^{b}	−۱۳۷^{c}	−۱۳۶^{c}	−۱۴۲^{d}

*حروف مشترک نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین معیار اطلاعات آکایک PTFهای ایجادشده می‌باشد.

هر عدد نشان‌دهنده میانگین آکایک PTFهای ایجادشده در مکش‌های مختلف می‌باشد. مثلا عدد ۱۲۶- میانگین آکایک PTF_1های ایجادشده در مکش‌های ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر است.

PTF_4: در این سطح از پارامترهای تراکم محصور و کربنات کلسیم جهت برآورد LLWR بهره‌گیری شد. با مقایسه بین PTF_3 و PTF_4، PTF_3 دارای *AIC* منفی‌تر و R^2 بیشتر نسبت به مدل پایه و PTF_4 است (جدول ۲). همچنین تفاوت معنی‌داری بین PTF_4 با PTF_2 که تنها از پارامترهای تراکم به‌همراه ویژگی‌های پایه به‌عنوان تخمین‌گر استفاده شده بود وجود نداشت (جدول ۳). این نتایج نشان می‌دهد که کربن آلی و میانگین وزنی قطر

خاکدانه‌ها با توجه به مطالب ذکر شده در فوق نسبت به کربنات کلسیم، برآوردگرهای بهتری جهت برآورد LLWR می‌باشند.

PTF_5: در این سطح ورودی‌های مرحله سه و چهار به‌عنوان برآوردگر وارد مدل شدند. بهره‌گیری از این برآوردگرها سبب بهبود معنی‌دار *AIC* نسبت به مدل پایه شد (جدول ۲). مقایسه PTF_5 نسبت به PTF_2، PTF_3 و PTF_4 نشان داد که PTF_5 دارای *AIC* منفی‌تر و R^2 بیشتری بود (جدول ۲). در نتیجه استفاده از پارامترهای میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، ماده آلی و کربنات کلسیم به‌همراه پارامترهای تراکم محصور سبب بهبود معنی‌دار تخمین LLWR و همچنین کاهش *RMSE* نسبت به کلیه مدل‌های قبلی شد (جدول ۲). نیشابوری و همکاران (۲۰۱٤) ویژگی‌هایی از قبیل بافت، کربن آلی و کربنات کلسیم را برای برآورد مستقیم LLWR استفاده نمودند و گزارش کردند که LLWR با درصد رس همبستگی منفی و معنی‌دار داشت. همچنین اثر کربنات کلسیم بر LLWR معنی‌دار نشد و از طرفی در پژوهش ایشان اثر ماده آلی بر LLWR مثبت به‌دست آمد. در این پژوهش نیز استفاده از کربنات کلسیم همراه با پارامترهای تراکم محصور بهبود معنی‌داری را در برآورد LLWR نسبت به تابع دوم و دیگر توابع ایجاد نکرد.

PTF_6: بهره‌گیری از CEC به‌همراه پارامترهای تراکم محصور و ویژگی‌های پایه به‌عنوان برآوردگر موجب بهبود معنی‌دار برآورد LLWR نسبت به مدل پایه و PTF_2 شد (جدول۲ و ۳). براند و تیسیر (۲۰۰۰) منحنی نگهداری آب خاک را در طیف وسیعی از رس‌های آهکی و یا اشباع شده با کلسیم بررسی و بیان کردند که ویژگی رطوبتی از یک خاک رسی به خاک دیگر متفاوت بوده و به مقدار رس، CEC، توزیع اندازه ذرات و تنش هیدرولیکی بستگی دارد. هنگامی که پتانسیل کاهش می‌یابد تأثیر CEC در نگهداری آب افزایش می‌یابد (براند ۲۰۰٤). بنابراین احتمالا به دلیل تأثیر گذاری CEC بر منحنی نگهداری آب خاک استفاده از CEC سبب بهبود برآورد LLWR گردید. استفاده از CEC به‌عنوان برآوردگر بهبود معنی‌داری را نسبت به PTF_3، ایجاد نکرد (جدول ۲ و ۳). این نتایج نشان داد که CEC به‌همراه پارمترهای تراکم محصور در مقایسه با ماده آلی و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها همراه با پارامترهای تراکم محصور که در PTF_3 به‌عنوان برآوردگر استفاده شده است، برآوردگر بهتری است و توانسته مقدار خطا را کاهش دهد. همچنین با مقایسه PTF_6 نسبت به PTF_4 نتایج نشان داد که *AIC* و R^2 نسبت به PTF_4 به‌ترتیب کاهش و افزایش داشت و برآوردگر اثر معنی‌داری نسبت به مدل پایه و PTF_4 بر بهبود برآورد LLWR داشت. این نتایج نشان داد که CEC نسبت به کربنات کلسیم برآوردگر بهتری برای LLWR است. همچنین با مقایسه این سطح با PTF_5 نتایج نشان داد که PTF_5 نسبت به PTF_6 سبب کاهش *AIC* و افزایش R^2 شد. بنابراین استفاده از کربنات کلسیم به‌همراه ماده‌آلی و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به‌سبب استفاده از پارامترهای بیشتر سطح خطا را کاهش داده و نسبت به CEC بهبود بیشتری در تخمین LLWR ایجاد کردند.

PTF_7: در این مرحله از ورودی‌های مرحله پنج و شش برای برآورد LLWR استفاده شد. با توجه به اینکه در این سطح از ورودی‌های PTF_5 و PTF_6 استفاده شد و با توجه به مطالب گفته شده PTF_5 و PTF_6 نسبت به PTF_3 و PTF_4 دارای *AIC* منفی‌تری بودند (جدول ۲ و ۳)، بنابراین استفاده از این ورودی‌ها در سطح هفتم سبب بهبود معنی‌دار برآورد LLWR نسبت به تمام مدل‌های قبلی گردید و بهترین تخمین برای LLWR به‌دست آمد (شکل ۱). بنابراین پارمترهای تراکم به‌همراه کربن آلی، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، ظرفیت تبادل کاتیونی و کربنات کلسیم بهترین مجموعه متغیرهای تخمین‌گر برای برآورد LLWR بودند و در صورت نبود بعضی از پارامترها با توجه به مطالب بالا می‌توان از سایر توابع برای برآورد استفاده کرد.

با مقایسه میانگین معیار اطلاعات آکایک PTFهای ایجادشده با استفاده از پارامترهای تراکم محصور در مکش‌های ٤٠، ٦٠ و ١٠٠ سانتی‌متر، PTFهای ایجادشده در مکش ٤٠ و٦٠ سانتی‌متر اختلاف معنی‌داری از نظر این آماره با هم نداشتند (جدول ٤). اما توابع انتقالی ایجادشده در مکش ١٠٠ سانتی‌متر نسبت به مکش ٤٠ و ٦٠ سانتی‌متر دارای AIC منفی‌تر و همچنین R^2 بالاتر بودند. مطابق با جدول ١ به‌ترتیب بیش‌ترین میانگین تنش پیش‌تراکمی

جدول ۴-مقایسه میانگین معیار اطلاعات آکایک PTFها در مکش‌های مختلف با استفاده از آزمون دانکن در سطح ۵ درصد.

مکش (cm)	AIC
٤٠	$-١٣٤/٢٨^{a\#}$
٦٠	$-١٣٤/٤٣^{a}$
١٠٠	$-١٣٦/٠٦^{b}$

*حروف مشترک نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین معیار اطلاعات آکایک PTFهای ایجادشده در مکش ٤٠، ٦٠ و ١٠٠ سانتی‌متر می‌باشد.
هر کدام از اعداد فوق نشان‌دهنده میانگین آکایک PTFهای ایجادشده در مکش مربوطه می‌باشند.

در مکش ٤٠، ٦٠ و ١٠٠ سانتی‌متر مشاهده شد. بنابراین کمترین میانگین تنش پیش‌تراکمی در مکش ١٠٠ سانتی-متر بود.

مطابق با جدول ١ بیش‌ترین میانگین شاخص تراکم نیز در مکش ١٠٠ سانتی‌متر مشاهده شد. تأثیر مقدار رطوبت اولیه بر شاخص تراکم وابسته به خصوصیات خاک است. کیو و دلاگ (١٩٩٦) مشاهده کردند با کاهش مکش ماتریک (افزایش رطوبت)، شاخص تراکم افزایش یافت. پریرا و همکاران (٢٠٠٧) با مطالعه بر روی یک خاک سیلتی گزارش کردند که شاخص تراکم با افزایش رطوبت در دامنه رطوبتی پایین افزایش یافت و با افزایش رطوبت در دامنه رطوبتی بالا کاهش پیدا کرد.

در واقع با کاهش مکش تا نزدیک اشباع و افزایش رطوبت از مکش ١٠٠ به ٦٠ و ٤٠ سانتی‌متر، آب فضای منافذ را پر کرده و در نتیجه بیشتر فشار خارجی به آب منفذی وارد می‌شود (طهماسبی و همکاران ١٣٨٧) و از تراکم خاک جلوگیری می‌کند و تأثیری بر ساختمان خاک ندارد (طهماسبی و همکاران ١٣٨٧) و موجب افزایش تنش پیش‌تراکمی می‌شود. همچنین دیاز زوریتا و گرسو (٢٠٠٠) مشاهده کردند که با افزایش مقدار نگهداشت آب در خاک مقدار جرم مخصوص ظاهری در آزمایش پروکتور استاندارد افزایش یافت. در واقع با افزایش جرم مخصوص ظاهری، نسبت پوکی کاهش یافته و تنش پیش‌تراکمی افزایش می‌یابد (مصدقی و همکاران ٢٠٠٣). از طرفی نیز دامنه رطوبتی با کمترین محدودیت متأثر از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مختلف است. بنابراین احتمالا مقدار رطوبت در مکش ٤٠ و ٦٠ سانتی‌متر سبب کاهش اثر خصوصیات ساختمان خاک بر ویژگی‌های تراکمی خاک شده است.

در بیان رابطه بین ساختمان خاک و منحنی تراکم، چان و همکاران (٢٠٠٦) گزارش کردند که این منحنی تابعی از ساختمان خاک است. بنابراین تشابهات بسیار زیادی بین دو منحنی تراکم محصور و منحنی نگهداری آب خاک وجود دارد. از طرفی در این پژوهش نیز θ_{FC} در مکش ١٠٠ سانتی‌متر در نظر گرفته شد (هایز و همکاران ١٩٥٥). همچنین در این پژوهش θ_{AFP} با استفاده از جرم مخصوص ظاهری در مکش ١٠٠ سانتی‌متر محاسبه شد.

در نتیجه با توجه به نکات فوق مقدار رطوبت
در مکش١٠٠ سانتی‌متر و جرم مخصوص ظاهری، ویژگی‌های مکانیکی از قبیل تنش پیش‌تراکمی، شاخص تراکم، شاخص تورم، ضرایب رطوبتی و LLWR را تحت تأثیر قرار داده است. در نتیجه منحنی تراکم محصور در

مکش ۱۰۰ سانتی‌متر بیش‌ترین نزدیکی را با LLWR داشت. بنابراین با توجه به دلایلی که گفته شد استفاده از پارامترهای تراکم در مکش ۱۰۰ سانتی‌متر سبب بهبود معنی‌دار براورد LLWR گردید.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش تأثیر پارامترهای تراکم محصور در کنار سایر خصوصیت‌های فیزیکی و شیمیایی برای برآورد LLWR بهره‌گیری شد. به‌همین علت پارامترهای فیزیکی و شیمیایی که قبلا توسط محققان دیگر مورد استفاده قرار گرفته بودند به‌صورت گام‌به‌گام همراه با پارامترهای تراکم برای تخمین استفاده شدند. مطابق با این پژوهش هرکدام از پارامترهای فیزیکو شیمیایی متفاوت در کنار پارامترهای تراکم محصور جواب‌های متفاوتی داشتند. افزودن پارامترهای منحنی تراکم محصور در مکش‌های مختلف سبب بهبود معنی‌دار برآورد LLWR گردید. افزودن پارامترهایی مانند کربن آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی، کربنات کلسیم و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها همراه با پارامترهای منحنی تراکم محصور به مدل پایه موجب بهبود برآورد LLWR گردید. اثر پارامترهای منحنی تراکم محصور بر بهبود LLWR نشان‌دهنده ارتباط نزدیک منحنی تراکم محصور با منحنی نگهداری آب خاک و منحنی مشخصه مقاومت خاک می‌باشد. چرا که تشابهات بسیار زیادی بین دو منحنی تراکم محصور و منحنی نگهداری آب خاک وجود دارد. این یافته‌ها نشان‌دهنده اهمیت پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی در کنار هم در برآورد مقادیر LLWRاست و می‌تواند تاییدی بر تأثیرپذیری LLWR از خصوصیت‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی خاک باشد. روی هم‌رفته بهره‌گیری از پارامترهای منحنی تراکم محصور به‌عنوان برآوردگر برای تخمین LLWR پیشنهاد می‌شود.

منابع مورد استفاده

طهماسبی م، همت ع، وفائیان م و مصدقی مر، ۱۳۸۷. ارزیابی مقاومت تراکمی (تنش پیش‌تراکمی) خاک با استفاده از آزمایش‌های نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور. مجله علوم آب و خاک - علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۱۲، شماره ٤٤، صفحه‌های ۲٤٥ تا ۲٥٥.

Akaike H, 1974. A new look at the statistical model identification. IEEE Transactions on Automatic Control 19:716-723.

Alexandrou A and Earl R, 1998. The relationship among the pre-compaction stress, volumetric water content and initial dry bulk density of soil. Journal of Agricultural Engineering Research 71: 75-80.

Baumgartl T and Koeck B, 2004. Modeling volume change and mechanical properties with hydraulic models. Soil Science Society of America Journal 68: 57-65.

Benjamin J, Nielsen D and Vigil M, 2003. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. Geoderma 116: 137-148.

Bower CA, Reitemeier R and Fireman M, 1952. Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. Soil Science 73: 251-262.

Bruand A, 2004. Utilizing mineralogical and chemical information in PTFs. Developments in Soil Science 30: 153-158.

Bruand A and Tessier D, 2000. Water retention properties of the clay in soils developed on clayey sediments: Significance of parent material and soil history. European Journal of Soil Science 51: 679-688.

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.

Campbell GS and Shiozawa S, 1994. Prediction of hydraulic properties of soils using particle-size distribution and bulk density data. Pp. 317–328. In: van Genuchten MTh et al. (eds). Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils. University of California, Riverside, USA.

Casagrande A, 1936. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. Pp 60-64. Proceedings of the international conference on soil mechanics and foundation engineering: Harvard University Cambridge.

Chan K, Oates A, Swan A, Hayes R, Dear B and Peoples M, 2006. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. Soil and Tillage Research 89: 13-21.

Clement C. 1966, A simple and reliable tension table. Journal of Soil Science 17(1): 133-135.

Cui Y and Delage P. 1996. Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt. Géotechnique 46: 291-311.

Da Silva A, Kay B and Perfect E, 1994. Characterization of the least limiting water range of soils. Soil Science Society of America Journal 58:1775-1781.

Da Silva AP and Kay B, 1997. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. Soil Science Society of America Journal 61: 877-883.

Dexter A, Czyż E, Richard G and Reszkowska A, 2008. A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. Geoderma 143: 243-253.

Dıaz-Zorita M and Grosso GA, 2000. Effect of soil texture, organic carbon and water retention on the compactability of soils from the Argentinean pampas. Soil and Tillage Research 54(1): 121-126.

Gee GW and Or D, 2002. Particle- Size analysis. Pp. 225-295. In: Warren AD, (ed). Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America Inc.

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.

Haise H, Haas H and Jensen L, 1955. Soil moisture studies of some Great Plains soils: II. Field capacity as related to 1/3-atmosphere percentage, and "minimum point" as related to 15-and 26-atmosphere percentages. Soil Science Society of America Journal 19: 20-25.

Håkansson I, Voorhees WB and Riley H, 1988. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. Soil and Tillage Research 11: 239-282.

Hamza M and Anderson W, 2005. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. Soil and Tillage Research 82: 121-145.

Horn R, 1981. A method for the determination of the preconsolidation load. Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung 22(1): 20-26.

Horn R, Richards BG, Gräsle W, Baumgartl T and Wiermann C, 1998. Theoretical principles for modelling soil strength and wheeling effects a review. J. Plant Nutr. Soil Sci 161: 333-346.

Husz G, 1967. The determination of pF-curves from texture using multiple regressions. (German) Z. Pflanzenernähr Düng Bodenkd 116: 23-29.

Hwang SI, Lee KP, Lee DS and Powers SE, 2002. Models for estimating soil particle-size distributions. Soil Science Society of America Journal 66: 1143-1150.

Keller T, Lamandé M, Schjønning P and Dexter AR, 2011. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. Geoderma 163: 13-23.

Koolen A, 1974. A method for soil compactibility determination. Journal of Agricultural Engineering Research 19: 271-278.

Mosaddeghi M, Hemmat A, Hajabbasi M and Alexandrou A. 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.

Nemes A and Rawls WJ, 2006. Evaluation of different representations of the particle-size distribution to predict soil water retention. Geoderma 132: 47-58.

Neyshabouri MR, Kazemi Z, Oustan S and Moghaddam M, 2014. PTFs for predicting LLWR from various soil attributes including cementing agents. Geoderma 226: 179-187.

Pereira J, Défossez P and Richard G, 2007. Soil susceptibility to compaction by wheeling as a function of some properties of a silty soil as affected by the tillage system. European Journal of Soil Science 58: 34-44.

Pirmoradian N, Sepaskhah A and Hajabbasi M, 2005. Application of fractal theory to quantify soil aggregate stability as influenced by tillage treatments. Biosystems Engineering 90: 227-234.

Richards L and Weaver L, 1943. Fifteen-atmosphere percentage as related to the permanent wilting percentage. Soil Science 56: 331-340.

Sims JT, Sparks DL, Page AL, Helmke PA, Loeppert RH, Soltanpour PN, Tabatabai MA, Johnston CT and Sumner ME, 1996. Lime requirement, Pp. 491-515. In: Sparks DL, (ed). Methods of Soil Analysis. Part 3-Chemical Methods. Soil Science Society of America Inc.

Soane B and Van Ouwerkerk C, 1994. Soil compaction in crop production. Elsevier, Amsterdam. Pp. 662.

Taylor HM, Robertson GM, Parker JJ, 1966. Soil strength– root penetration relations for medium to coarse-textured soil materials. Soil Science 102: 18-22.

Tejada M and Gonzalez J, 2006. The relationships between erodibility and erosion in a soil treated with two organic amendments. Soil and Tillage Research 91: 186-198.

Vaz CM, Bassoi LH and Hopmans JW, 2001. Contribution of water content and bulk density to field soil penetration resistance as measured by a combined cone penetrometer–TDR probe. Soil and Tillage Research 60: 35-42.

Walkley A and Black IA, 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.

Wösten J, Pachepsky YA and Rawls W, 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. Journal of hydrology 251: 123-150.

Yoder RE, 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. Agronomy Journal 28: 337-351.