برآورد حدود پایداری خاک با استفاده از ویژگی‌های زودیافت خاک

رسول میرخانی،[1*] سعید سعادت، محمود شعبانپور شهرستانی، پروین آریا و مژگان یگانه

کارشناس ارشد مؤسسه تحقیقات خاک و آب؛ Rasoul_mirkhani@yahoo.com

استادیار پژوهش مؤسسه تحقیقات خاک و آب؛ Saeed_saadat@yahoo.com

استادیار دانشگاه گیلان؛ M_shabanpur@yahoo.com

کارشناس مؤسسه تحقیقات خاک و آب؛ Parvinaria@yahoo.com

کارشناس ارشد مؤسسه تحقیقات خاک و آب؛ Yeganehmojgan@yahoo.com

چکیده

حدود پایداری آتربرگ خاک از ویژگی‌های مکانیکی مهم خاک می‌باشند. که در طبقه‌بندی خاکهای چسبنده برای اهداف مهندسی بکار می‌روند و همبستگی بالایی با سایر ویژگیهای پایداری خاک دارند. این خصوصیات در برآورد سایر شاخص‌های مهندسی خاک مانند مقاومت برشی، توان بارپذیری، تراکم‌پذیری، آماس پذیری و سطح ویژه کاربرد دارند. در کشاورزی نیز این ویژگی‌ها کاربرد دارند، به عنوان مثال در رابطه با رطوبت مناسب برای خاک‌ورزی استفاده می‌شوند. با توجه به اهمیت حدود پایداری و نظر به وقت‌گیر بودن و نیاز به تجربه کافی برای اندازه‌گیری آنها، لازم است که این خصوصیات با استفاده از سایر خصوصیات زودیافت خاک با دقتی قابل قبول برآورد شوند. هدف از این پژوهش بررسی امکان استفاده از خصوصیات زودیافت خاک برای برآورد حدود پایداری خاک (حدروانی، حد خمیرایی و شاخص خمیرایی) و در نهایت ارایه مدلی برای آنها بوده است. برای انجام این کار از خاک‌های منطقه کرج تعداد 37 نمونه خاک با بافت متوسط به روش نمونه‌برداری کاملاً تصادفی و مرکب از عمق 0-20 سانتی‌متری برداشت شد. تعداد 30 نمونه برای ایجاد توابع و 7 نمونه برای ارزیابی اعتبار توابع مورد استفاده قرار گرفت. فراونی نسبی ذرات خاک به روش هیدرومتری، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات آمونیوم، چگالی ظاهری به روش کلوخه، درصد کربن آلی به روش والکلی و بلک، حد روانی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه کاساگراند و حد خمیری خاک با روش تهیه فتیله اندازه‌گیری شدند. پس از بررسی همبستگی بین متغیرهای مستقل (ویژگیهای زودیافت خاک)، با استفاده از نرم افزار Minitab11 با روش رگرسیون گام به گام، مناسبترین ترکیب از متغیرهای مستقل برای برآورد حد روانی، حد خمیرایی و شاخص خمیرایی انتخاب و معادلات رگرسیونی چند متغیره ارائه شد. نتایج نشان داد از بین متغیرهای مستقل، حد روانی همبستگی معنی‌داری با متغیرهای ظرفیت تبادل کاتیونی، چگالی ظاهری و رطوبت اشباع خاک (R^2_{adj} = 0/77)، حد خمیرایی همبستگی معنی‌داری با متغیرهای ظرفیت تبادل کاتیونی، چگالی ظاهری، درصد رس و رطوبت اشباع خاک (R^2_{adj} = 0/72) و شاخص خمیرایی همبستگی معنی‌داری با متغیرهای چگالی ظاهری، درصد رس و کربن آلی خاک (R^2_{adj} = 0/625) داشتند و بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده همبستگی معنی‌داری وجود داشت. این همبستگی برای توابع برآورد کننده حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیرایی در سطح 0/1 درصد معنی‌دار بودند. تجزیه‌های آماری برای ارزیابی توابع انتقالی نشان داد که مقادیر میانگین هندسی نسبت خطا (GMER) برای توابع برآوردکننده حدروانی، حد خمیرایی و شاخص خمیرایی به ترتیب 0/99، 0/99 و 1/06 و مقادیر انحراف معیار هندسی نسبت خطا (GSDER) نیز به ترتیب 1/03، 1/04 و 1/32 بوده است که نشان دهنده اعتبار بالای توابع ارائه شده برای حد روانی و حد خمیرایی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: توابع انتقالی خاک، حدود پایداری، حد روانی، حد خمیرای، شاخص خمیرایی، فراوانی نسبی ذرات، چگالی ظاهری، کربن آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی.

۱- نویسنده مسئول، آدرس: تهران، خیابان جلال آل احمد- خیابان کارگر شمالی- روبروی بیمارستان شریعتی- مؤسسه تحقیقات خاک و آب- کد پستی 14155-6185

* دریافت: 84/10/25 و پذیرش: 86/6/4

مقدمه

توابع انتقالی خاک[1] درسال 1989 توسط Bouma تعریف و پیشنهاد شد. توابع انتقالی خاک توابع برآوردکنندهٔ خصوصیات دیریافت[2] خاک با استفاده از خصوصیات زودیافت[3] خاک می‌باشند (Bouma و Van Lanen، 1987). از خصوصیات دیریافت خاک می‌توان به خصوصیات هیدرولیکی و پارامترهای آن، ظرفیت تبادلی کاتیونی و حدود پایداری آتربرگ اشاره کرد. در حقیقت توابع انتقالی یکی از روش‌های غیرمستقیم در اندازه‌گیری ویژگی‌های دیریافت خاک می‌باشند و ویژگی‌های پایه‌ای خاک[4] را به سایر ویژگی‌های خاک ارتباط می‌دهند. اگر چه اغلب توابع انتقالی خاک برای برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک ایجاد شده‌اند، ولی استفاده از این توابع به خصوصیات هیدرولیکی محدود نشده و برای برآورد خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک نیز بکار رفته‌اند (میرخانی، 1382).

از جمله توابع انتقالی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک می‌توان به برآورد پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی خاک و برآورد نقاط منحنی مشخصه رطوبتی با استفاده از برخی خصوصیات خاک اشاره کرد. میرخانی و همکاران (1382) توابعی را برای برآورد نقاط منحنی مشخصه رطوبتی خاک و پارامترهای معادله وان‌گنوختن ارائه دادند. فرخیان و همایی (1381) نیز توابع انتقالی پارامتریک و نقطه‌ای را برای خاک‌های گچی شرق اصفهان ارائه دادند. Vereecken و همکاران (1989) بر روی نمونه‌های دست نخورده با استفاده از متغیرهای مقدار شن، رس، کربن آلی و چگالی ظاهری توابعی برای برآورد پارامترهای معادله منحنی رطوبتی خاک ارائه دادند. حسینی عزآبادی (1381) معادله تک پارامتری Gregson و همکاران را مبنای کار خود قرار داده و توابع انتقالی پارامتریک برای برآوردن پارامترهای این معادله ارائه داد.

از جمله ویژگی‌های شیمیایی خاک می‌توان به برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی و بازهای قابل تبادل با استفاده از متغیرهای مقدار رس، مواد آلی و pH خاک اشاره کرد. به عنوان مثال خاکشناسان برای خاکهای چمنی غرب کانادا رابطه CEC = 2/5 O.C + 0/57 Clay (محمودی و حکیمیان، 1374). برای ایالت کبک کانادا رابطه CEC = 2/5 O.C + 0/57 Clay، برای ایالت آلبرتای کانادا رابطه CEC = 2/5 O.C + 0/57 Clay و برای ناحیه هالدیمند نرفولک اونتاریوی کانادا رابطه CEC = 2/5 O.C + 0/57 Clay را پیشنهاد کردند (Macdonald، 1998). Bell و Van keulen (1995) با استفاده از متغیرهای مستقل مقدار رس، ماده آلی و pH خاک برای خاک‌های چهار منطقه از مکزیک تابعی برای برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی ارائه دادند (R^2 = 0/96). Krogh و همکاران (2000) با استفاده از 1643 نمونه از خاک‌های دانمارک توابعی برای برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی ارائه دادند (R^2 =0/90). میرخانی و همکاران (1384) برای خاکهای لرستان معادله‌ای برای برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی ارائه دادند (R^2 =0/87).

از ویژگی‌های مکانیکی خاک می‌توان به برآورد انقباض حجمی[5]، حدروانی[6] و حدخمیری[7] و شاخص خمیرایی[8] با استفاده از مقدار مواد آلی، مقدار رس و ظرفیت تبادل کاتیونی و نیز به برآورد فاکتور فرسایش‌پذیری خاک از متغیرهای میانگین هندسی قطر ذرات، مقدار رس و ماده آلی اشاره کرد. برای مثال Mbagwu و Abeh (1998) طی تحقیقی بر روی خاکهای مناطق گرمسیری نیجریه برای توسعه مدلهای ساده برآورد و توصیف خواص مهندسی خاک با استفاده از خواص زودیافت خاک، نشان دادند که یک رابطه خطی قوی بین انقباض حجمی (VS)، حد روانی (LL) و حد خمیرایی (PL) از یک طرف و ظرفیت تبادل کاتیونی، مواد آلی و درصد رس از طرف دیگر وجود دارد و نیز معادلات تجربی ارائه شده قبل از کاربرد باید در دامنه وسیعی از خاکهای گرمسیری آزمون شوند.

حدود پایداری آتربرگ در طبقه‌بندی خاکهای چسبنده برای اهداف مهندسی بکار می‌روند و همبستگی بالایی با سایر ویژگیهای پایداری خاک دارند. این حدود همچنین در برآورد سایر شاخص‌های مهندسی خاک مانند مقاومت برشی، توان بارپذیری، تراکم‌پذیری، آماس‌پذیری و سطح ویژه کاربرد دارند (Carter، 1993). در کشاورزی نیز این ویژگی‌ها کاربرد دارند، به عنوان مثال در رابطه با رطوبت مناسب برای خاک‌ورزی استفاده می‌شوند. با توجه به اهمیت حدود پایداری آتربرگ و نظر به وقت‌گیر بودن و نیاز به تجربه کافی برای اندازه‌گیری آنها، امکان برآورد این ویژگیها با استفاده از سایر ویژگیهای قابل دسترس خاک با دقتی قابل قبول ضروری به نظر می‌رسد. هدف از

1-Pedotransfer functions
2- Costly measured properties
3 - Readily available properties
4 - Soil basic properties

5 - Volumetric shrinkage
6- Liquid limit
7- Plastic limit
8 - Plasticity index

پژوهش بررسی امکان استفاده از ویژگی‌های زودیافت خاک برای برآورد حدود پایداری خاک (حدروانی، حدخمیرایی و شاخص خمیرایی) و در نهایت ارایه مدلی برای آنها بوده است.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش ابتدا از خاک‌های منطقه کرج تعداد 37 نمونه خاک با بافت متوسط به روش نمونه‌برداری کاملاً تصادفی و مرکب از لایه 20-0 سانتی‌متری برداشت شد. از این تعداد نمونه، 30 نمونه برای ایجاد توابع انتقالی و 7 نمونه برای ارزیابی اعتبار توابع مورد استفاده قرار گرفت. فراوانی نسبی ذرات خاک به روش هیدرومتری، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات آمونیوم، چگالی ظاهری به روش کلوخه و درصد کربن آلی به روش والکلی و بلک اندازه‌گیری شد (آریا و میرخانی، 1384؛ علی احیایی و بهبهانی زاده، 1372). برای اندازه‌گیری حد روانی خاک از روش کاساگراند استفاده شد. برای این منظور ابتدا 5-4 نمونه درصد رطوبت مختلف بین 30-20 ضربه اندازه‌گیری و با استفاده از رابطه $LL=W_n\left(\frac{N}{25}\right)^{0.121}$ (N، تعداد ضربات و Wn، درصد رطوبت در ضربه Nام) حد روانی (LL) تعیین و میانگین آنها به عنوان حدروانی نمونه خاک گزارش شد. برای اندازه‌گیری حد خمیرایی نمونه‌ها از روش تهیه فتیله استفاده شد. در این روش ابتدا نمونه مرطوب خاک در دست به شکل فتیله درآورده شد. وقتی که قطر فتیله به حدود 3/2 میلی‌متر رسید، به قطعات مختلف تقسیم شد و مجدداً به شکل فتیله درآورده شد. این عمل آن قدرا ادامه یافت تا عملاً به شکل فتیله‌ای به قطر حدود 3/2 میلی‌متر تبدیل نشود. نمونه‌ای از این فتیله‌ها در آون قرار داده شد و رطوبت وزنی آن که برابر حد خمیرایی خاک بود، اندازه‌گیری شد (آریا و میرخانی، 1384).

پس از بررسی همبستگی بین متغیرهای مستقل، با استفاده از نرم افزارهای Minitab 11 با روش رگرسیون گام به گام[1]، مناسب‌ترین ترکیب از متغیرهای مستقل برای ایجاد توابع، انتخاب و معادله رگرسیونی چند متغیره خطی ارائه شد (Ryan و Joiner 1994).

برای ارزیابی اعتبار[2] توابع، از 7 نمونه خاک که در ایجاد توابع بکار نرفته بودند، استفاده شد و سپس میانگین هندسی نسبت خطا [3] (GMER) و میانگین هندسی انحراف معیار نسبت خطا [4] (GSDER) برای توابع توابع با استفاده از معادلات زیر محاسبه گردید:

$$\varepsilon_i = \left(\frac{\varphi_p}{\varphi_m}\right)_i$$

$$GMER = \exp\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \ln(\varepsilon_i)\right)$$

$$GSDER = \exp\left[\left(\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n} [\ln(\varepsilon_i) - \ln(GMER)]^2\right)^{\frac{1}{2}}\right]$$

که در این معادلات، ε_i = نسبت خطا در نمونه iام، φ_p= مقادیر برآورد شده ویژگی وابسته، φ_m= مقادیر اندازه‌گیری شده آن ویژگی و n = تعداد نمونه‌ها می‌باشند. GMER برابر یک نشان دهنده تطبیق کامل بین مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده می‌باشد. GMER کوچکتر از یک نشان دهنده برآورد کمتر[5] از مقادیر اندازه‌گیری شده و GMER بزرگتر از یک نشان دهنده برآورد بیشتر[6] از از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. GSDER برابر یک نشان دهنده تطبیق کامل مقادیر برآورد شده با مقادیر اندازه‌گیری شده می باشد ولی با افزایش خطای برآورد، GSDER افزایش می‌یابد. بنابراین بهترین مدل، مدلی است که دارای GMER نزدیک به یک و GSDER کوچک باشد (Wagner و همکاران، 2001).

نتایج و بحث

جدول 1 محدوده پارامترهای اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد.

محدوده داده‌ها نشان می‌دهد که نمونه‌های استفاده شده بجز چند نمونه که دارای بافت لوم رسی سیلتی و لوم رسی شنی می‌باشند، بیشتر نمونه‌ها دارای بافت متوسط می‌باشند. شکل 1 همبستگی بین حدروانی و حد خمیرایی با ویژگی‌های اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد.

مقایسه همبستگی بین حد روانی و حد خمیرایی با ویژگی‌های اندازه‌گیری شده نشان داد که حد روانی و حد خمیرایی بیشترین همبستگی را با ظرفیت تبادل کاتیونی داشته است. این امر بواسطهٔ تأثیر نوع رس از طریق ظرفیت تبادل کاتیونی بوده است. حد روانی و حد خمیرایی با چگالی ظاهری خاک همبستگی منفی نشان داده و این کاهش در حد روانی و حد خمیرایی روند یکسانی

1 - Stepwise regression method
2- Reliability
3- Geometric mean of error ratio
4- Geometric standard deviation of the error ratio
5- Underestimation
6- Overestimation

را نشان می‌دهد. دلیل این کاهش، افزایش درصد شن و کاهش درصد رس و سیلت با افزایش چگالی ظاهری می‌باشد که موجب کاهش حد روانی و حد خمیرایی با افزایش چگالی ظاهری شده است. همبستگی بین درصد رطوبت اشباع با حدروانی و حد خمیرایی نیز نشان می‌دهد که افزایش درصد رطوبت اشباع به دلیل تأثیر درصد رس، سیلت و مواد آلی بوده و موجب افزایش حد روانی و حد خمیرایی می‌شود.

در مرحلهٔ بعد به روش رگرسیون گام به گام مناسبترین ترکیب از متغیرهای مستقل برای برآورد حد روانی، حد خمیرایی و شاخص خمیرایی انتخاب و معادلات رگرسیونی چند متغیره ارائه شدند. نتایج در جدول 2 ارائه شده است.

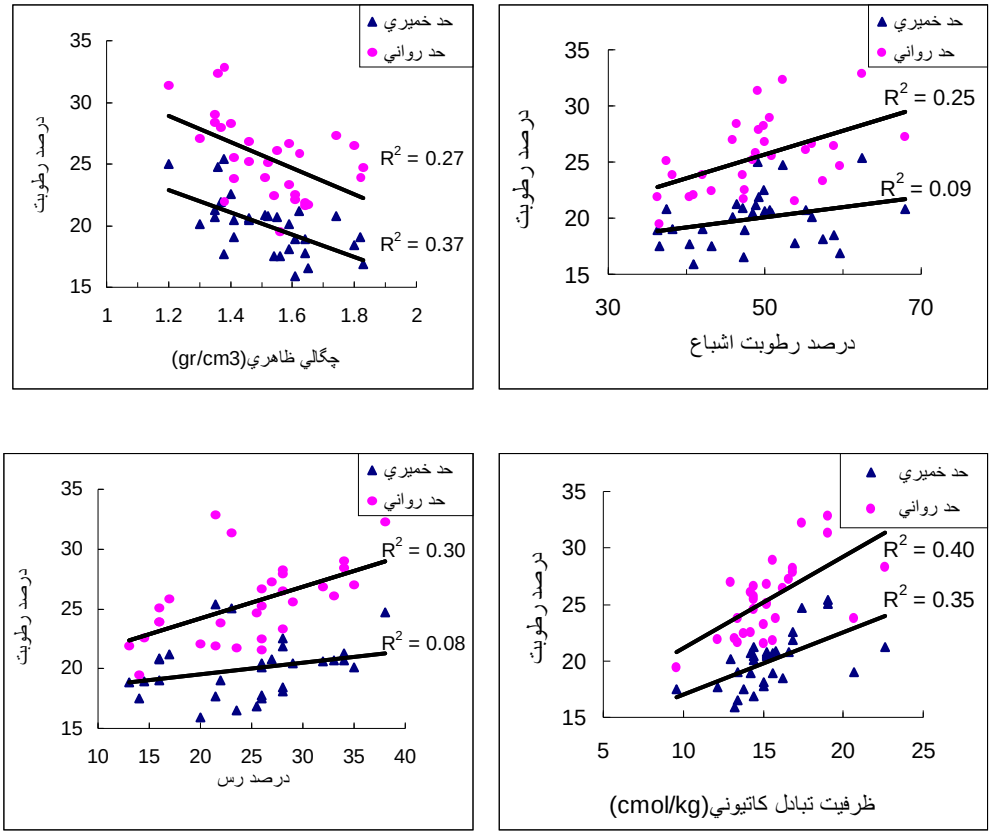
در جدول 2، LL : حد روانی خاک، PL : حد خمیرایی خاک، PI : شاخص خمیرایی خاک، Bd : چگالی ظاهری خاک، SP : درصد رطوبت اشباع خاک و CEC : ظرفیت تبادل کاتیونی می‌باشند.

توابع ارائه شده نشان دادند که از بین متغیرهای مستقل، استفاده از درصد رطوبت اشباع، ظرفیت تبادل کاتیونی و چگالی ظاهری برآورد خوبی از حد روانی (R^2_{adj} = 0/77)، استفاده از ظرفیت تبادل کاتیونی، چگالی ظاهری، رطوبت اشباع و درصد رس برآورد خوبی از حد خمیرایی (R^2_{adj} = 0/72) و استفاده از درصد کربن آلی، چگالی ظاهری و درصد رس برآورد خوبی از شاخص خمیرایی (R^2_{adj} = 0/62) را بدست می‌دهند. و توابع ارائه شده در سطح 0/1 درصد معنی‌دار می‌باشند. شکل 2 همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط توابع ارائه شده برای حد روانی، حد خمیرایی و شاخص خمیرایی را نشان می‌دهد.

شکل 2 نشان می‌دهد که بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده حدود پایداری همبستگی معنی‌داری وجود دارد. این همبستگی(R^2) برای توابع برآورد کننده حد روانی، حد خمیرایی و شاخص خمیرایی به ترتیب برابر 0/80، 0/76 و 0/66 می‌باشند. جدول 3 مقادیر GMER و GSDER را برای توابع ارایه شده نشان می‌دهد. تجزیه‌های آماری برای ارزیابی توابع انتقالی نشان داد که مقادیر میانگین هندسی نسبت خطا (GMER) برای توابع برآوردکننده حدروانی، حد خمیرایی و شاخص خمیرایی به ترتیب 0/99، 0/99 و 1/06 و مقادیر انحراف معیار هندسی نسبت خطا (GSDER) نیز به ترتیب 1/03، 1/04 و 1/32 بوده است که نشان می دهد که GMER در تمام توابع ارائه شده نزدیک به یک و GSDER نیز برای توابع برآورد کننده حد روانی و خمیرایی کوچک می‌باشد که نشان دهنده اعتبار بالای توابع ارائه شده برای برآورد حد روانی و حد خمیرایی می‌باشد. ولی برای برآورد شاخص خمیرایی با توجه به شکل 2- الف و جدول 3 بهتر است از تفاضل حد روانی و حد خمیرایی حاصل از توابع ارائه شده برای این حدود استفاده شود. با توجه به نتایج و ضرایب آماری مربوط به آنها، این معادلات برای مواردی که نیاز به دانستن مقدار دقیق نیست و تنها به برآوردی از آن می‌توان اکتفا کرد، توصیه‌پذیر است. ولی در اهداف تحقیقاتی روش اندازه‌گیری مستقیم کماکان بهترین روش است. همچنین معادلات بدست آمده تنها برای منطقه مورد مطالعه و مناطق مشابه معتبر بوده و پیش از کاربرد نیز می‌بایست اعتبار مدل آزموده شود.

جدول 1- محدوده پارامترهای اندازه‌گیری شده

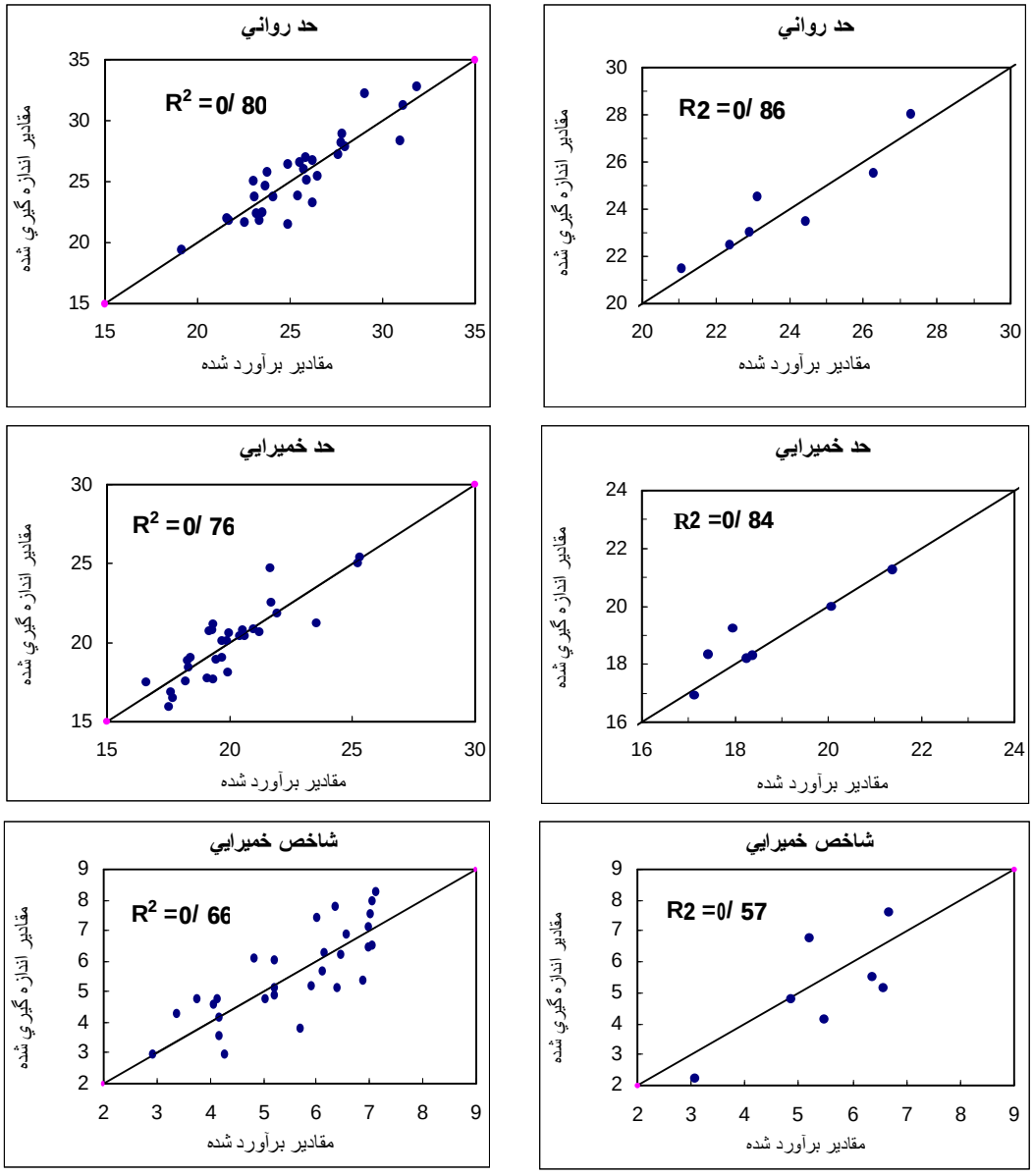
محدوده داده	پارامتر	محدوده داده	پارامتر
1/2-1/8	چگالی ظاهری	9/6-22/6	ظرفیت تبادل کاتیونی
19/44-32/83	حدروانی	0/2-1/72	درصد کربن آلی
15/93-25/38	حد خمیرایی	13-38	درصد رس
1/93-8/29	شاخص خمیرایی	25-53/5	درصد سیلت



شکل 1- همبستگی بین حد روانی و حد خمیرایی با ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک

جدول 2- توابع انتقالی ارائه شده برای برآورد حد روانی، حد خمیرایی و شاخص خمیرایی

توابع	R^2_{adj}
LL = 23/2+ 0/578CEC -10/9Bd + 0/203SP	77/4
PL = 26/0 + 0/418CEC -10/9Bd + 0/139 SP -0/107Clay	72/1
PI = -4/35 + 1/82O.C + 2/67Bd + 0/181Clay	62/5



(ب) (الف)

شکل 2- همبستگی بین مقادیر برآورد شده و اندازه گیری شده: (الف) بین مقادیر مورد استفاده در ارزیابی اعتبار توابع (ب) بین مقادیر مورد استفاده در ایجاد توابع

جدول 3- مقادیر GMER و GSDER برای توابع ارایه شده

متغیر وابسته	GMER	GSDER
حد روانی	0/993377	1/03426
حد خمیرایی	0/989936	1/03715
شاخص خمیرایی	1/05606	1/31699

فهرست منابع:

1. آریا، پ. و میرخانی، ر.، 1384، روش‌های تجزیه خصوصیات فیزیکی خاک. مؤسسه تحقیقات خاک و آب، نشریه فنی شماره 479.
2. میرخانی، ر.، شعبانپور، م. و سعادت، س.، 1384، استفاده از فراوانی نسبی ذرات و درصد کربن آلی برای برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی خاکهای استان لرستان، مجله علوم خاک و آب، جلد 19، شماره 2، صفحه242-235.
3. محمودی، ش. و حکیمیان، م.، 1374، مبانی خاکشناسی، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ایران.
4. علی احیایی، م. و بهبهانی‌زاده، ع. ا.، 1372، شرح و روش‌های تجزیه شیمیایی خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، نشریه فنی شماره 839.
5. فرخیان فیروزی، 1. و همایی، م.، 1382، اشتقاق توابع انتقالی خاکهای گچی به منظور برآورد نقطه‌ای منحنی رطوبتی، مجموعه مقالات هشتمین کنگره علوم خاک ایران، رشت، صفحه 1071-1069 .
6. فرخیان فیروزی، 1. و همایی، م.، 1382، برآورد پارامتریک ویژگی‌های هیدرولیکی خاک‌های گچی با استفاده از توابع انتقالی خاک، مجموعه مقالات هشتمین کنگره علوم خاک ایران، رشت، صفحه 967-965 .
7. حسینی عزآبادی. ج.، 1381، تخمین منحنی رطوبتی خاک با استفاده از مدل تک پارامتری، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
8. Bell, M. A. and H. Van Keulen. 1995. Soil pedotransfer functions for four Mexican soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 59: 865-871.
9. Bouma, J. and H. A. J. Van Lanen. 1987. Transfer functions and threshold values from soil characteristics to land qualities. In: Beek, K., P. A. Barrough and D. D Mc Cormack (Ed.)., Proc. Workshop by ISSS/SSSA on Quantified Land Evaluation Procedures, ITC publication No. 6, Enschede, the Netherlands, pp: 106-111.
10. Carter, M. R. 1993. Soil sampling and methods of analysis. pp: 823.
11. Krogh, L., H. Breuning- Madsen. and M. H. Greve. 2000. Cation exchange capacity pedotransfer function for Danish soils. Soil and Plant Sci. 50: 1-12.
12. MacDonald, K.B.1998. Development of pedotransfer functions for southern Ontario soils. report from Greenhouse and Processing Crops Research Center Harrow, Ontario. 01686-8-0436. pp:1-23
13. Mbagwu, J.S.C. and O.G. Abeh. 1998.Prediction of engineering properties of tropical soils using intrinsic pedological parameters. Soil Science, Baltimore,V:163, N:2, P: 93-102.
14. Ryan, B. F. and B. L. Joiner. 1994. Minitab Handbook. Durbuy Press. 483 pp.
15. Vereeeken, H., J. Meas., J. Fegen and P. Davius. 1989. Estimating the soil moisture retention characteristics form texture, bulk density and carbon content. Soil Sci: Soc. Am. J. 148 (6): 389-403.
16. Wagner, B., V. R. Tarnaeaski,V. Hennings, V. Muller, G. Wessolek and R. Plagge. 2001. Evaluation of pedotransfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. Geoferma. 102: 275-297.