برآورد نقطه‌ای و پارامتریک منحنی نگهداشت آب در خاک با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه در چند کشت و صنعت استان خوزستان

فرزاد مرادی[*1]، بیژن خلیل مقدم[2]، سیروس جعفری[3]، شجاع قربانی دشتکی[4]

۱*- مکاتبه کننده و دانشجوی کارشناسی ارشد خاکشناسی دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان: farzadmp2@yahoo.com تلفن: ۰۶۱۲۳۲۲۵۲۸۹

۲- استادیار گروه خاکشناسی دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان: moghaddam623@yahoo.ie تلفن: ۰۶۱۲۳۲۲۵۲۸۹

۳- استادیار گروه خاکشناسی دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان: siroosjafari@yahoo.com تلفن: ۰۶۱۲۳۲۲۵۲۸۹

۴- استادیار گروه خاکشناسی دانشگاه شهرکرد: shoja2002@yahoo.com تلفن: ۰۳۸۱۴۴۲۴۴۰۷

چکیده

منحنی نگهداشت آب در خاک (SWRC) اهمیت فراوانی در فیزیک خاک دارد و برای بسیاری از مطالعات آب و خاک مانند حفاظت خاک، برنامه ریزی آبیاری، زهکشی، انتقال املاح، رشد گیاهان و بررسی تنش آبی گیاهان ضروری می‌باشد. لیکن، اندازه‌گیری مستقیم آن هزینه بر و وقت‌گیر بوده و نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی ویژه‌ای دارد. به همین دلیل در سال‌های اخیر تلاش‌های فراوانی در راستای تخمین آن از خصوصیات زود یافت شده است. از طرفی بسط و تعمیم کاربرد توابع انتقالی مشتق شده از روی خاک‌های منطقه‌ای خاص، برای مناطق دیگر هنوز به طور قطعی رد یا تأیید نشده است و این مورد لزوم استفاده از توابع انتقالی محلی را خاطر نشان می‌کند. هدف از این پژوهش بررسی امکان استفاده از رگرسیون خطی چند گانه در برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی در چهار کشت و صنعت استان خوزستان و ارائه معادله‌ای ساده بود. دو نوع از توابع انتقالی نقطه‌ای و پارامتریک بررسی شد. نتایج نشان داد که برآوردهای پارامتریک با دقتی بیش از برآوردهای نقطه‌ای منحنی نگهداشت رطوبتی را تخمین می‌زند.

کلمات کلیدی: کشت و صنعت استان خوزستان، منحنی نگهداشت رطوبتی، رگرسیون چندگانه خطی، برآورد نقطه‌ای و پارامتریک

مقدمه

نیشکر یکی از گیاهان مناطق گرمسیری و از جمله قدیمی‌ترین گیاهان زراعی است که جهت تولید قند و شکر و تغذیه حیوانات و مصارف صنعتی کشت می‌شود. کشور پهناور ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود دارای اقلیم مناسب جهت کشت نیشکر در بخش های جنوبی و جنوب‌غربی بوده و کشت نیشکر در ایران سابقه بسیار طولانی دارد. در حال حاضر توسعه کشت نیشکر در کشور از رونق خاصی برخوردار گردیده است (فاکونیر، ۱۹۹۳).

منحنی نگهداشت آب در خاک [1] (SWRC) اهمیت فراوانی در فیزیک خاک دارد و برای بسیاری از مطالعات آب و خاک مانند حفاظت خاک، برنامه ریزی آبیاری، زهکشی، انتقال املاح، رشد گیاهان و بررسی تنش آبی گیاهان ضروری می‌باشد. از طرفی، افزایش نگرانی عمومی در مورد آلودگی آب‌های زیرزمینی و تخلیه زیر سطحی فاضلاب‌های مضر، موجب تحقیقات جدید بسیاری در رابطه با جریان در محیط غیر اشباع شده است (دسباراتس، ۱۹۹۵). به دلیل ناهمگنی بالای خاک و وقت‌گیر و پر هزینه بودن تعیین SWRC در مزرعه یا آزمایشگاه، روش‌های

1 . Soil Water Retention Curve

غیرمستقیم مانند توابع انتقالی خاک به طور وسیعی جهت برآورد SWRC از پارامترهای زودیافت خاک از جمله داده‌های توزیع اندازه ذرات، ماده آلی و جرم مخصوص ظاهری توسعه پیدا کرده‌اند. در حقیقت توابع انتقالی رابطه ریاضی بین دو یا بیشتر از پارامترهای زودیافت خاک و خصوصیات هیدرولیکی کمتر قابل دسترس (مانند SWRC) می‌باشد (عباسی و همکاران، ۲۰۱۰). با این رویکرد دیگر نیازی به داده‌های خیلی دقیق ویژگی‌های هیدرولیکی نیست. از دیگر سو، به دلیل تفاوت در اندازه‌گیریهای با روش‌های مختلف و نیز تغییرات مکانی- زمانی آن‌ها دقت اندازه‌گیری‌های مستقیم مورد تردید بوده و از این رو برآوردهای حاصل از روش‌های غیرمستقیم کافی به نظر می‌رسد (امامی وهمکاران، ۱۳۸۶).

توابع انتقالی به سه گروه عمده تقسیم بندی می‌شوند: توابع انتقالی کلاسی (راولز و براکن‌سیک، ۱۹۸۹؛ باکر و الیسون، ۲۰۰۸)، توابع انتقالی نقطه‌ای (راولز و همکاران، ۱۹۸۲؛ قنبریان علاویجه و میلان، ۲۰۱۰) و توابع انتقالی پارامتریک (راولز و براکن سیک، ۱۹۸۹؛ سانترا و داس، ۲۰۰۸). توابع انتقالی کلاسی توابعی هستند که میانگینی از ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را برای هر کلاس بافت خاک ارائه می‌کنند. این توابع ارزان و سریع هستند اما دقت آن‌ها در مقایسه با دیگر توابع انتقالی کمتر است. توابع انتقالی نقطه‌ای روابط رگرسیونی هستند که به طور معمول مقدار رطوبت را در مکش‌های ماتریک معین برآورد می‌کنند. در حالیکه در شیوه پارامتریک، پارامترهای تجربی مدل‌های مختلف منحنی نگهداشت رطوبتی مانند ون‌گنوختن، ۱۹۸۰؛ راولز و براکن‌سیک، ۱۹۸۹ و فردلند و زینگ، ۱۹۹۴ برآورد می‌شوند.

یکی از تکنیک‌های متداول که به طور وسیعی جهت توسعه توابع انتقالی استفاده می‌شود، رگرسیون خطی چندگانه [1] (MLR) است. در این شیوه، همه پارامترهای زودیافت (ورودی‌ها) به صورت خطی با پارامتر هدف (خروجی) مرتبط می‌شوند. فرم عمومی رگرسیون چندگانه خطی به صورت زیر است:

$$x \qquad (1)$$

که x پارامتر هدف، BD چگالی ظاهری، OM ماده آلی و ضرایب a، b، c، d و e ضرایب ثابت‌اند (عباسی و همکاران، ۲۰۱۰).

علاوه بر رگرسیون چندگانه تکنیک‌های پیچیده‌تری مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی (اسخاپ و همکاران، ۱۹۹۸)، شبکه‌های عصبی- فازی (کوبانر و همکاران، ۲۰۰۹)، ریاضیات فرکتال و مشابهت‌های مدرج [2] (کومگنا و همکاران، ۱۹۹۸) نیز جهت توسعه توابع انتقالی استفاده شده‌اند. مردون و همکاران (۲۰۰۶) نشان دادند که اگر چه اختلاف بین مدل‌های رگرسیونی و شبکه‌های عصبی مصنوعی از لحاظ آماری معنی دار نیست اما رگرسیون متغییرهای پارامتریک و نقطه‌ای مدل‌های هیدرولیکی خاک را بهتر از شبکه‌های عصبی مصنوعی برآورد می‌کنند. هانگ و ژانگ (۲۰۰۵) با استفاده از توزیع اندازه ذرات به عنوان داده های زودیافت و توابع انتقالی رگرسیونی خطی توانستند مشخصات منحنی رطوبتی را با ضریب همبستگی ۹۴٪ تخمین بزنند.

مبحث بسط و تعمیم کاربرد توابع انتقالی مشتق شده از روی خاک‌های منطقه‌ای خاص، برای مناطق دیگر هنوز به طور قطعی رد یا تأیید نشده است. توماسلا و هودنت (۱۹۹۸) اثر منطقه‌ای بودن خصوصیات توابع انتقالی را با ارزیابی عملکرد ضعیف توابع توسعه یافته برای مناطق معتدل در نواحی گرمسیری (حاره)، خاطر نشان ساختند. توماسلا و همکاران (۲۰۰۰) برای برآورد پارامترهای مدل رطوبتی ون‌گنوختن (۱۹۸۰) در تعدادی از خاک‌های مناطق حاره کشور برزیل، توابع انتقالی ارائه نمودند که ریشه میانگین مربعات خطا در این توابع به مراتب کمتر از حالتی بود که از همین توابع انتقالی در مناطق معتدل استفاده شد. پذیرفتن اثر منطقه‌ای بودن توابع انتقالی از یک سو و عدم وجود توابع انتقالی توسعه یافته برای برآورد خصوصیات هیدرولیکی خاک‌های کشت و صنعت‌های خوزستان، به عنوان یک راه حل عمده در صرفه جویی زمان و هزینه، از دیگر سو، می‌تواند انگیزه قوی برای توسعه توابع انتقالی در این مناطق باشد.

مواد و روش‌ها

جمع‌آوری داده‌ها

1 . Multiple linear regression
2 . Fractal mathematics and scaled similarities

محدوده مورد مطالعه این تحقیق، چهار کشت و صنعت دعبل خزاعی، امیرکبیر، کارون و هفت تپه در استان خوزستان واقع در جنوب غربی ایران انتخاب شده است. منطقه مورد مطالعه دارای رژیم رطوبتی اریدیک و رژیم حرارتی هایپرترمیک می‌باشد. استان خوزستان با مساحتی حدود ۶۴,۲۳۶ کیلومترمربع، بین ۴۷ درجه و ۴۱ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۹ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ و ۲۹ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۴ دقیقه عرض شمالی از خط استوا، بر روی یک واحد فیزیوگرافی دشت سیلابی قدیمی واقع شده است . متوسط بارندگی سالیانه ۲۳۳ میلیمتر که بیشتر در ماههای آذر، دی و بهمن نازل می‌گردد. گرم ترین ماه سال تیر ماه با حداکثر مطلق ۵۴ درجه سانتیگراد و سردترین ماه سال بهمن ماه با حداقل ۳- درجه سانتیگراد و متوسط نم نسبی سالانه ۵۵/۵ درصد می‌باشد.

تعداد ۳۱۰ نمونه خاک از دو عمق ۴۰-۰ و ۸۰-۴۰ پروفیل، که به طور تصادفی انتخاب شده بودند، جمع‌آوری شد و بعد از انتقال به آزمایشگاه، هوا خشک شده، سپس کوبیده و از الک دو میلیمتر عبور داده شدند. درصد رطوبت اشباع به روش وزن سنجی، بافت خاک به روش هیدرومتری (جی و باودر، ۱۹۸۶)، کربنات کلسیم معادل ($CaCO_3$) به روش کلسیمتری (نلسون، ۱۹۸۲)، جرم مخصوص ظاهری (BD) به روش سیلندری (بلک و هارت، ۱۹۸۶)، نسبت سدیم جذب سطحی شده (SAR) به کمک روش‌های معمول آزمایشگاهی (پیچ و همکاران،۱۹۸۲)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) به روش الک تر (ون باول، ۱۹۴۹) و حدود خمیری (PL) و روانی (LL) به ترتیب توسط روش‌های فتیله و کاساگراند (باولز، ۱۹۸۶) اندازه‌گیری شدند. ماده آلی (OC) نیز به روش والکلی و بلک (والکلی، ۱۹۴۷) بر روی ذرات کوچکتر از ۰/۵ میلیمتر اندازه‌گیری شد.. هدایت الکتریکی (EC) در عصاره اشباعی خاک و واکنش خاک (pH) در گل اشباع نیز به ترتیب توسط دستگاه‌های EC متر و pH متر اندازه‌گیری شدند (پیچ و همکاران، ۱۹۸۲). مقادیر رطوبت وزنی خاک‌های دست نخورده در مکش‌های ماتریک ۱۰ و ۳۳ کیلوپاسکال توسط ستون آویزان آب و ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۵۰۰ کیلو پاسکال با استفاده از دستگاه صفحات فشاری بدست آمد و با استفاده از جرم مخصوص ظاهری خاک‌ها به رطوبت حجمی تبدیل شده و سپس منحنی مشخصه رطوبتی آن‌ها ترسیم شد.

برای برآورد پارامترهای معادله منحنی نگداشت رطوبتی ون‌گنوختن از نرم افزار RETC (ون‌گنوختن و همکاران، ۱۹۹۱) استفاده شد. با استفاده از این نرم افزار ابتدا معادله مربوطه انتخاب و مقادیر رطوبت حجمی در پتانسیل‌های صفر، ۳۳، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال، جرم ویژه ظاهری و درصد اجزاء بافت خاک برای هر نمونه وارد نرم افزار RETC گردید. با فرض $m = 1 - 1/n$ پارامترهای α، θ_r، θ_s و n با استفاده از روش حداقل مجموع مربعات خطا برای هر نمونه محاسبه گردید. به منظور پردازش داده‌ها، نخست نرمال بودن داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. زیرا آزمون فرض بر پایه نرمال بودن توزیع داده‌ها بنا شده است. آزمون نرمال بودن با استفاده از نرم افزار STATISTICA نسخه ۶ برای همه داده‌ها انجام شد وبه دلیل نرمال نبودن برخی پارامترها تبدیلات زیر صورت گرفت:

$$\theta_r^* = (\theta_r)^{0.5},$$

که در آن θ_r^*، α^* و n^* بیانگر کمیت تبدیل شده می‌باشد. در مراحل بعد که شامل تحلیل رگرسیون و همبستگی بود، شکل نرمال پارامتر مورد استفاده قرار گرفت. در رگرسیون خطی چندگانه اگر بین متغییرهای مستقل رابطه خطی قوی مشاهده شود، همراستایی چندگانه[1] به وجود خواهد آمد که این همراستایی نتایج تحلیل رگرسیون را غیر معتبر می‌سازند. یکی از روش‌های تصحیح همراستایی چندگانه استفاده از تبدیل‌ها به جای متغیرهای همراستا می‌باشد. داده‌های مربوط به فراوانی نسبی هر یک از ذرات رس، شن و سیلت همبستگی خطی قوی با هم نشان دادند. به همین دلیل برای جلوگیری از ایجاد خطا، این مقادیر با هم به کار نرفتند.

ارزیابی مدل‌ها

جهت ارزیابی اعتبار توابع، از تحلیل خطاهای باقیمانده و اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده استفاده می‌شود. آماره‌های استفاده شده در این تحقیق ضریب تبیین[2] (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا[3] (RMSE) و میانگین هندسی نسبت خطا[4] (GMER) هستند. بیان ریاضی این آماره‌ها به صورت زیر است:

1 . Multicolinearity
2 . Determination of coefficient
3 . Root mean square error
4 . Geometric mean of error ratio

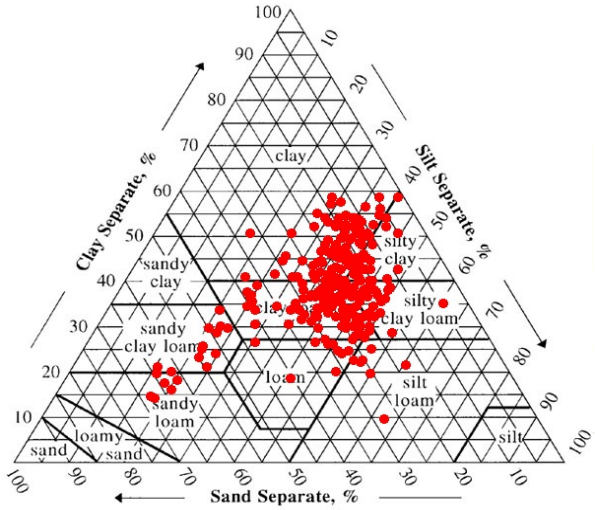
$$R \quad (۲)$$

$$R \quad (۳)$$

$$G \quad (۴)$$

نتایج وبحث

شکل۱ توزیع فراوانی نسبی ذرات خاک‌های مورد استفاده در پی‌ریزی مدل MLR را نشان می‌دهد.



شکل .. توزیع فراوانی نسبی ذرات خاک‌های مورد مطالعه

مقایسه این شکل با مثلث بافت خاک نشان می‌دهد خاک‌های مورد مطالعه در کلاس‌های بافتی رسی، لوم رسی، رسی سیلتی، لوم رسی سیلتی، لوم رسی شنی، لوم، لوم سیلتی و لوم شنی قرار می‌گیرند. از ۳۱۰ نمونه جمع آوری شده، ۲۱۷ نمونه برای تعیین توابع انتقالی و ۹۳ نمونه باقیمانده برای انجام آزمون‌های تعیین دقت توابع بدست آمده به کار رفتند. جدول ۱ تا ۳ خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و هیدرولیکی کل نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱- پارامترهای آماری خصوصیات فیزیکی اندازه‌گیری شده

پارامتر آماری	شن٪	سیلت٪	رس٪	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (mm)	میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (mm)	جرم ویژه ظاهری (gr/cm^3)	٪PI
کمترین	۱	۱۵	۱۰	۰/۴۸	۰/۰۱	۱/۳۲	۰/۲۵
بیشترین	۶۸	۶۲	۵۹	۱/۹۱	۱	۱/۹	۲۵/۸
میانگین	۲۳/۰۳	۳۸/۰۱	۳۸/۹۷	۱/۰۹	۰/۹	۱/۶۵	۸/۴۸
انحراف معیار	۱۰/۹۴	۷/۸۱	۹/۰۳	۰/۳۴	۰/۱۳	۰/۱۱	۴/۱۵

جدول ۲- پارامترهای آماری خصوصیات شیمیایی اندازه‌گیری شده

پارامتر آماری	ماده آلی٪	کربنات کلسیم٪	هدایت الکتریکی (ds/m)	واکنش خاک	نسبت سدیم قابل جذب
کمترین	۰/۰۷	۳۲/۲	۰/۴۷	۷/۲۷	۰/۰۷
بیشترین	۲/۴۹	۴۵/۵	۱۷/۹	۸/۲۳	۲۱/۴۸
میانگین	۰/۹۹	۳۹/۴۹	۲/۴۸	۷/۸۳	۵/۱۳
انحراف معیار	۱/۸۷	۱/۸۷	۳/۲۴	۰/۱۴	۴/۰۳

جدول ۳- پارامترهای آماری خصوصیات هیدرولیکی اندازه‌گیری شده در معادله ون‌گنوختن

پارامتر آماری	θ_S (%v/v)	θ_r (%v/v)	α (1/cm)	n	m
کمترین	۰/۳۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۱/۰۶	۰/۰۵
بیشترین	۰/۹۲	۰/۲۷	۱/۰۹	۲/۳	۰/۵۷
میانگین	۰/۶۱	۰/۰۶	۰/۰۳	۱/۲۸	۰/۲
انحراف معیار	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۱۷	۰/۰۹

در رگرسیون‌های چند متغییره، مدلی مناسب‌تر است که با داشتن تعداد متغییرهای اندک از دقت زیادی برخوردار باشد. به همین دلیل تا آنجا که امکان داشته باشد، باید متغییرهایی را که نقش چندانی در افزایش R^2 مدل رگرسیونی ندارند، از مدل نهایی حذف کرد.

جدول ۴ توابع انتقالی نقطه‌ای ایجاد شده در کشت و صنعت‌های مورد بررسی

شماره تابع	متغیرهای وابسته	تابع انتقالی	R^2
۱	θ_s		۰/۷۴
۲	θ_{10}		۰/۶۲
۳	θ_{33}		۰/۵۸
۴	θ_{100}		۰/۵۰
۵	θ_{500}		۰/۶۱
۶	θ_{1500}		۰/۵۱

ورود هر متغییر به این توابع در سطح ۰/۵ درصد معنی دار بود. توابع انتقالی نقطه‌ای مقادیر رطوبت را در پتانسیل‌های ماتریک معین (۰، ۱۰، ۳۳، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال) با استفاده از فراوانی نسبی ذرات (٪)، جرم ویژه ظاهری (gr/cm^3)، میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها (mm)، ماده آلی (٪)، هدایت الکتریکی عصاره اشباع (ds/m)، نسبت سدیم جذب سطحی شده (-)، کربنات کلسیم معادل (٪) و شاخص خمیرایی[1] (cm^3/cm^3) برآورد می‌کنند. این توابع در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. همچنین توابع پارامتریک پارامترهای معادله

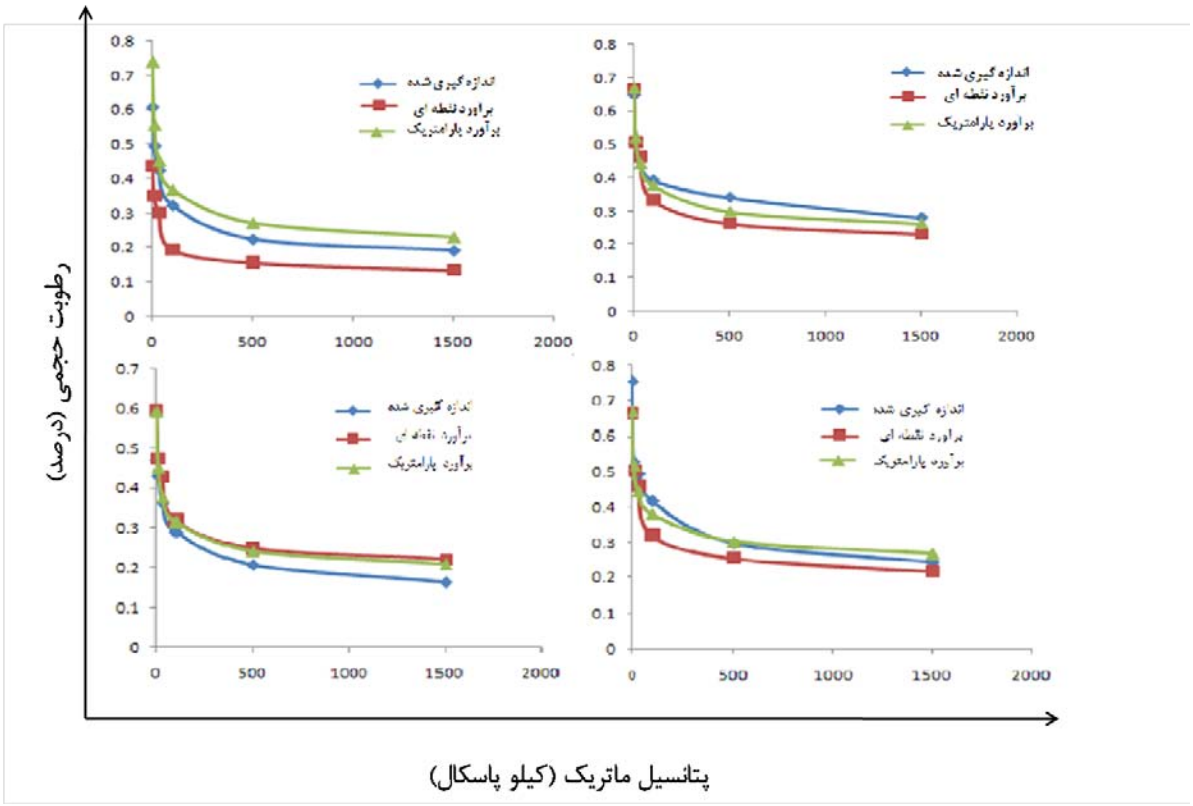
1 . PI = LL - PL

ون‌گنوختن (۱۹۸۰) را با فرض $m = 1 - 1/n$ با استفاده از متغییرهای مستقل فراوانی نسبی ذرات (٪)، جرم ویژه ظاهری (gr/cm^3)، میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها (mm)، ماده آلی (٪) و کربنات کلسیم معادل (٪) برآورد می‌کنند. این توابع در جدول ۵ نشان داده شده‌اند.

جدول ۵ توابع انتقالی پارامتریک ایجاد شده در کشت و صنعت‌های مورد بررسی

شماره تابع	متغیرهای وابسته	تابع انتقالی	R^2
۱	θ_s		۰/۵۷
۲	θ_r		۰/۱۴
۳	α		۰/۳۱
۴	n		۰/۱۸

توابع بدست آمده در جدول ۵ در مقایسه با توابع جدول ۴ همبستگی ضعیف‌تری از خود نشان داده و R^2 کمتری دارند. این تفاوت دقت بالاتر توابع انتقالی نقطه‌ای را در برآورد SWRC در منطقه مورد بررسی نشان نمی‌دهد. جهت مقایسه منحنی‌های رطوبتی خاک، شش نمونه به طور تصادفی انتخاب و منحنی‌های رطوبتی حاصل از داده‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شده با استفاده از توابع انتقالی نقطه‌ای با هم مقایسه شدند. نتایج این مقایسه‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. به این شیوه اصطلاحاً آزمون دقت می‌گویند. نتایج بدست آمده نشان داد که همبستگی معنی داری بین داده‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شده با استفاده از توابع نقطه‌ای وجود دارد.



شکل ۲ مقایسه منحنی‌های نگهداشت رطوبتی اندازه‌گیری و برآورد شده با استفاده از توابع انتقالی نقطه‌ای

به منظور سنجش اعتبار توابع بدست آمده، مقادیر آماره‌های R^2، RMSE و GMER بر روی مجموعه داده های اعتبار سنجی (۹۳ نمونه) در برآورد نقطه‌ای و پارامتریک مقادیر رطوبتی در جداول ۵ و ۶ آورده شده است. آماره RMSE میانگین ریشه دوم مربعات خطا بوده و میزان انحراف نتایج حاصل از مدل در مقایسه با مشاهدات را بیان می‌کند. با توجه به این جداول ملاحظه می‌شود که مقدار RMSE در برآورد پارامتریک کمتر از برآورد نقطه‌ای SWRC است.

آماره R^2 یا ضریب تبیین، بیانگر ارتباط خطی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده می‌باشد. مقدار R^2 برابر یک به این معنی است که جفت داده‌های اندازه‌گیری و برآورد شده دقیقاً روی یک خط ۱:۱ قرار می‌گیرند. طبق جداول ۵ و ۶ بالاترین مقادیر این آماره مربوط به توابع برآورد کننده پارامتریک می‌باشند. آماره GMER نشان بیش برازشی (GMER>1) یا کم برازشی (GMER<1) مدل است. بر طبق این آماره مقادیر رطوبت در تمام دامنه مکش‌های مورد بررسی در برآورد نقطه‌ای و در مکش‌های پایین (کمتر از ۳۳ کیلوپاسکال) در برآورد پارامتریک، کمتر از مقدار حقیقی تخمین زده شده‌اند. همچنین مقادیر این آماره نیز نشان از برتری برآورد پارامتریک نسبت با برآورد نقطه‌ای دارد.

جدول ۵ آماره‌های محاسبه شده برای ارزیابی اعتبار توابع اشتقاق یافته در برآورد نقطه‌ای مقادیر رطوبتی

متغیرهای وابسته	R^2	RMSE	GMER
θ_s	۰/۹	۰/۱۹۴۵	۰/۸۱۴۸
θ_{10}	۰/۹	۰/۱۵۸۵	۰/۸۱۲۵
θ_{33}	۰/۸۹	۰/۱۴۲۸	۰/۸۴۴۸
θ_{100}	۰/۸	/۱۵۹۵	۰/۶۸۶۷
θ_{500}	۰/۷۹	۰/۱۲۷۰	۰/۶۶۲۵
θ_{1500}	۰/۸	۰/۱۰۳۹	۰/۷۰۶۸

جدول ۶ آماره‌های محاسبه شده برای ارزیابی اعتبار توابع اشتقاق یافته در برآورد پارامتریک مقادیر رطوبتی

متغیرهای وابسته	R^2	RMSE	GMER
θ_s	۰/۹۶	۰/۱۱۶۴	۱/۱۰۲۱
θ_{10}	۰/۹۷	۰/۰۹۲	۱/۰۴۴۴
θ_{33}	۰/۹۶	۰/۰۸۴۶	۱/۰۱۱۸
θ_{100}	۰/۹۵	۰/۰۸	۰/۹۸۳۴
θ_{500}	۰/۹۳	۰/۰۷۰۷	۰/۹۵۸۸
θ_{1500}	۰/۹۱	۰/۰۷۰۳	۰/۹۶۶۶

منابع

۱. فاکونیر، ر. ۱۳۸۳. نیشکر اصول زراعت و تولید. مترجمان: حمید مدنی و قربان نورمحمدی. دانشگاه آزاد اسلامی. اراک. ۱۵۰ص.

2. Abbasi, Y., B. Ghanbarian-Alavijeh., A. M. Liaghat and M. Shorafa. 2010. Evaluation of Pedotransfer Functions for Estimating Soil Water Retention Curve of Saline and Saline-Alkali Soils of Iran. Soil Science Society of China. **21**: 230–237.
3. Baker, L. and Ellison, D. 2008. Optimisation of pedotransfer functions using an artificial neural network ensemble method. Geoderma. 144: 212–224.
4. Blake G R, and Hartge K H, 1986. Bulk density. Pp. 363-375. In: Klute, A. (eds). Methods of soil analysis. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA. Madison. WI.
5. Bowels, G. E. 1986. Engineering properties of soils and their measurement. McGraw Hill Book Company, New York. 187 pp.
6. Cobaner, M., Unal, B and Kisi, O. 2009. Suspended sediment concentration estimation by an adaptive neuro-fuzzy and neural network approaches using hydro-meteorological data. Journal of Hydrology. 367: 52–61.
7. Comegna V., Damiani P., Somella A. (1998): Use of a fractal model for determining soil water retention curves. Geoderma, **85**: 307–323.

8. Comegna V., Damiani P., Somella A. 1998. Use of a fractal model for determining soil water retention curves. Geoderma. **85**: 307–323.
9. Desbarats, A. J. 1995. Upscaling capillary pressure saturation curves in heterogeneous porous media. Water Resour. Res.31: 281-288.
10. Fredlund, D. G., Xing, A., 1994. Equations for the soil –water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal 31: 521 – 532.
11. Gee G W, and Bauder J W, 1986. Particle size analysis. Pp. 383-411. In: Methods of soil analysis. 2nd ed. Klute, A. (eds). Agron. Monogr. 9. ASA. Madision. WI.
12. Ghanbarian-Alavijeh, B. and Mill´an, H. 2010. Point pedotransfer functions for estimating soil water retention curve. Int. Agrophys. 24: 243–251.
13. Haung ,G., and Zhang, R. 2005. Evaluation of soil water retention curve with the poresolid fractal model. Geoderma. 127: 52-61.
14. Merdun, H., Cınar, O., Meral, R. & Apan, M. (2006). Comparison of artificial neural network and egression pedotransfer functions for prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil Till Res*., 90, 108-116.
15. Nelson R E, 1982. Carbonate and gypsum. Pp. 181-199. In: A.L. Page (eds). Methods of Soil Analysis, part 2. American Society of Agronomy, Madison. WI.
16. Page, A.L., R.H. Miller and D.R. Keeeney. (eds.). 1982. Methods of soil analysis. Part2-Chemical and Microbiological methods. Seconds edition. Soil Science Society of America, Inc. Publisher Madison, Wisconsin. USA.
17. Rawls, W. J. and Brakensiek, D. L. 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. In Morel-Seytoux, H. J. (ed.) Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling-Theory and Practice. Kluwer Academic Publishing, Dordrecht. pp. 275–300.
18. Rawls, W. J., Brakensiek, D. L. and Saxton, K. E. 1982. Estimation of soil water properties. T. ASAE. 25: 1316–1320.
19. Santra, P and Das, B. S. 2008. Pedotransfer functions for soil hydraulic properties developed from a hilly watershed of Eastern India. Geoderma. 146: 439–448.
20. Schaap, M. G., Leij, F. J. and van Genuchten, M. Th. (1998b) Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. J. Soil Sci. Soc. Am, 62, 847–855.
21. Tomasella J., Hodnett M. G., and Rossato L. 2000. Pedotransfer function for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 64:327–338.
22. Tomasella, J., and Hodnett, M.G. 1998. Estimating soil water retention characteristic from limited data in Brazilian Amazonia. Soil Sci. 163:190-202.
23. Van Bavel, C. H. M. 1949. Mean weight diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 14: 20-23.
24. Van Genuchten, M. Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 892-898.
25. Van Genuchten, M.Th., S.M. Lesch, and S.R. Yates. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Version 1.0. U.S. Salinity Lab., Riverside, CA.
26. Walkley A, 1947. A Critical examination of a rapid method for determining soil organic carbon in soils. Effect of variations in digestion conditions and inorganic soil constituents. Soil Science Society of American Journal. 63: 251-263.