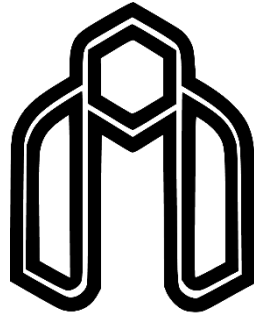


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده کشاورزی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه‌های آبی

برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک با استفاده از توابع انتقالی

نگارنده:

فاطمه دهقانی

اساتید راهنما:

دکتر خلیل اژدری

دکتر روزبه موذن زاده

اساتید مشاور:

دکتر وجیهه درستکار

دکتر محمدهادی موحد نژاد

تیر ۱۳۹۸

در این صفحه صورت جلسه دفاع را قرار دهید. لازم است پس از صحافی این صفحه مجدداً توسط دانشکده مهر گردد و استاد راهنما با امضای خود اصلاحات پایان نامه را تایید کند.

تقدیم به

پدر و مادر مهربانم

که در سختی ها و دشواری های زندگی پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بودن

تقدیر و تشکر

پاس خدایی را که اول و آخر وجود است، بی آنکه اولی بر او پیشی بگیرد و یا آخری پس از او باشد؛ خدایی که دست هر چشمی از دامن

دیدارش کوتاه است و اندیشه و فهم و صف کنندگان از وصفش عاجز است. (صحیفه سجادیه)

به رسم ادب و به رسم شاگردی از محضر اساتید راهنمای گرامی جناب آقای دکتر خلیل اژدری و جناب آقای دکتر روزه مؤذن زاده کمال

پاس را دارم که بازحات بی دریغشان یاری رسان من در طول پایان نامه بودند. و نیز از اساتید مشاور گرامی سرکار خانم دکتر وجهیه در ستکار و

جناب آقای دکتر محمد مهدی موحد نژاد کمال پاس را دارم که بی دریغ دانش گران قدر خویش را در اختیار این جانب قرار دادند. و از اساتید محترم،

جناب آقای دکتر سید حسین حسینی و جناب آقای دکتر مهدی دلفی که زحمت داوری این پایان نامه را بر عهده داشته اند و با لطف و

بزرگواری فراوان، آن را مطالعه و مورد عنایت قرار داده اند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

همچنین از دوست عزیزم افسانه یحیایی، و بهکلاسی های محترم آقایان رضامحمدی نسب و سعید نجار زاده که در تمام مراحل پایان نامه یاری ام

نمودند سپاسگذارم.

فاطمه دهقانی، سیر ۱۳۹۸

تعهد نامه

اینجانب فاطمه دهقانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد (دکتری) رشته مهندسی سازه‌های آبی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک با استفاده از توابع انتقالی تحت راهنمایی خلیل اژدری و دکتر موذن زاده متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه‌های رایانه‌ای ، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

دانستن ویژگی‌های هیدرولیکی خاک نظیر منحنی نگهداشت رطوبتی، پیش‌شرط لازم برای مدل کردن حرکت آب و انتقال املاح در خاک است. روش مستقیم برآورد این ویژگی پرهزینه و زمان‌بر است. در این پژوهش منحنی نگهداشت رطوبتی برای تعداد ۸۰ نمونه خاک که از مزارع کشاورزی شهرستان شاهرود (بسطام) جمع‌آوری شده بودند تعیین شد. برای این منظور توابع انتقالی پارامتریک و نقطه‌ای بر اساس روش رگرسیون خطی چندگانه و شبکه عصبی مصنوعی توسعه یافتند. پارامترهای فیزیکی (مانند جرم مخصوص ظاهری، توزیع فراوانی ذرات) و شیمیایی (مانند ماده آلی و آهک) به‌عنوان ورودی مدل‌ها در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. مقادیر رطوبت خاک در پتانسیل‌های ماتریک صفر، ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۱۰۰-، ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰- و ۱۵۰۰- کیلوپاسکال به کمک دستگاه صفحات فشاری اندازه‌گیری شد. مشخصات ۵۶ نمونه از خاک برای توسعه مدل‌ها و مشخصات ۲۴ نمونه از خاک‌ها برای صحت‌سنجی نتایج در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که مدل درنر با اختصاص مقادیر (m^3/m^3) $\text{RMSE}=0/0069$ ، $\text{GMER}=0/994$ در نقطه ظرفیت زراعی و مقادیر (m^3/m^3) $\text{RMSE}=0/012$ ، $\text{GMER}=1/02$ در نقطه پژمردگی دائم، مدل ون‌گنوختن با اختصاص مقادیر (m^3/m^3) $\text{RMSE}=0/0086$ ، $\text{GMER}=0/976$ در نقطه ظرفیت زراعی و مقادیر (m^3/m^3) $\text{RMSE}=0/024$ ، $\text{GMER}=1/08$ در نقطه پژمردگی دائم بهترین نتایج و مدل کمپل با اختصاص مقادیر $\text{RMSE}=0/228$ ، $\text{GMER}=0/003$ ضعیف‌ترین عملکرد را در برآورد رطوبت ظرفیت زراعی داشته‌اند. نتایج حاصل از مقایسه روش‌های ANN و MLR در برآورد نقطه‌ای رطوبت نشان داد که مدل MLR با اختصاص مقادیر $\text{RMSE}=0/087$ و $\text{RMSE}=1/166$ به ترتیب در مکش ۰/۳ و ۱۵ بار و مدل ANN با اختصاص مقادیر $\text{RMSE}=0/076$ و $\text{RMSE}=0/086$ به ترتیب در مکش ۰/۳ و ۱۵ بار با بدترین و بهترین عملکرد همراه بودند.

کلمات کلیدی: توابع انتقالی، شبکه عصبی مصنوعی، شاهرود، منحنی نگهداشت رطوبتی خاک

مقالات مستخرج از پایان نامه

۱-دهقانی ف، اژدری خ، موذن زاده ر، درستکار و، موحد نژاد م ه، (۱۳۹۷) "مقایسه عملکرد مدل های رزتا و درنر در برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک" ششمین همایش علمی پژوهشی مدیریت جامع منابع آب و خاک، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

فهرست مطالب

فصل ۱ : مقدمه.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۱-۱-۱- منحنی نگهداشت رطوبتی خاک و اهمیت آن در بخش‌های مختلف.....	۲
۲-۱- اندازه‌گیری منحنی نگهداشت رطوبتی خاک.....	۳
۳-۱- اندازه‌گیری غیرمستقیم منحنی نگهداشت رطوبتی خاک.....	۴
۴-۱- ضرورت و اهمیت موضوع.....	۵
۵-۱- اهداف تحقیق.....	۶
۶-۱- روش انجام تحقیق.....	۶
۷-۱- ساختار پایان‌نامه.....	۷
فصل ۲ : کلیات و بررسی منابع.....	۹
۱-۲- اصول فیزیکی حاکم بر جریان آب و خاک.....	۱۰
۲-۲- منحنی نگهداشت آب در خاک.....	۱۰
۳-۲- نقاط مهم در منحنی نگهداشت رطوبتی خاک.....	۱۱
۱-۳-۲- ظرفیت زراعی (FC).....	۱۱
۲-۳-۲- نقطه پژمردگی دائم (PWP).....	۱۲
۳-۳-۲- آب قابل دسترس (PAW).....	۱۲
۴-۳-۲- آب سهل‌الوصول (RAW).....	۱۲
۵-۳-۲- مکش ورود هوا (AEV).....	۱۲
۴-۲- کاربردهای منحنی نگهداشت رطوبتی خاک.....	۱۳
۵-۲- عوامل مؤثر بر شکل منحنی رطوبتی.....	۱۳
۶-۲- مدل‌سازی منحنی رطوبتی خاک.....	۱۴
۱-۶-۲- ناحیه ورود هوا یا ناحیه اشباع موئینه‌ای.....	۱۴
۲-۶-۲- ناحیه غیراشباع یا ناحیه تحت مکش.....	۱۴
۳-۶-۲- ناحیه جذب سطحی یا ناحیه اشباع باقی‌مانده.....	۱۵
۷-۲- مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده.....	۱۵
فصل ۳ : مواد و روش.....	۳۱
۱-۳- موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی.....	۳۲
۲-۳- داده‌های موردنیاز.....	۳۳

۳۵	۳-۳-۳ ویژگی‌های زودبافت خاک
۳۵	۱-۳-۳ بافت خاک
۳۵	۲-۳-۳ میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات
۳۵	۳-۳-۳ جرم مخصوص ظاهری
۳۶	۴-۳-۳ جرم مخصوص حقیقی
۳۶	۵-۳-۳ اسیدیته و هدایت الکتریکی
۳۷	۶-۳-۳ کربنات کلسیم
۳۷	۷-۳-۳ کربن آلی خاک
۳۷	۸-۳-۳ کلسیم و منیزیم
۳۷	۹-۳-۳ سدیم و پتاسیم
۳۷	۱۰-۳-۳ مقدار رس قابل پراکنش
۳۷	۱۱-۳-۳ شاخص انبساط آزاد خاک
۳۸	۱۲-۳-۳ اندازه‌گیری منحنی نگهداشت رطوبتی خاک
۳۸	۴-۳ مدل‌های مورد استفاده
۳۹	۱-۴-۳ مدل کمپل
۳۹	۲-۴-۳ مدل بروکس و کوری
۳۹	۳-۴-۳ مدل ون گنوختن (۱۹۸۰)
۴۰	۴-۴-۳ مدل درنر (۱۹۹۴)
۴۰	۵-۳ معرفی نرم‌افزار مورد استفاده
۴۰	۱-۵-۳ نرم‌افزار RETC
۴۰	۲-۵-۳ نرم‌افزار Rosetta
۴۱	۳-۵-۳ شبکه عصبی مصنوعی
۴۲	۶-۳ شاخص‌های آماری
۴۲	۱-۶-۳ شاخص ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE)
۴۲	۲-۶-۳ میانگین خطا (ME)
۴۳	۳-۶-۳ نسبت خطای متوسط هندسی (GMER)
۴۳	۴-۶-۳ نسبت خطای انحراف استاندارد هندسی (GSDER)
۴۵	فصل ۴ : نتایج و بحث
۴۶	۱-۴ مقدمه
۴۷	۲-۴ توابع انتقالی خاک (PTF _s)
۴۷	۱-۲-۴ توابع انتقالی پارامتریک
۴۷	۱-۱-۲-۴ ارزیابی عملکرد توابع انتقالی پارامتریک در بافت لوم
۴۷	۱-۱-۲-۴ منحنی نگهداشت رطوبتی خاک در بافت لوم
۴۹	۲-۱-۲-۴ ارزیابی کمی توابع انتقالی پارامتریک در بافت لوم
۵۲	۳-۱-۲-۴ برآورد آب قابل دسترس در بافت لوم
۵۴	۴-۱-۲-۴ مقایسه بین رطوبت پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در بافت لوم

۶۰.....	۲-۱-۲-۴- ارزیابی عملکرد توابع انتقالی پارامتریک در بافت سیلت لوم
۶۰.....	۱-۲-۱-۲-۴- منحنی نگهداشت رطوبتی خاک در بافت سیلت لوم
۶۲.....	۲-۲-۱-۲-۴- ارزیابی کمی توابع انتقالی پارامتریک در بافت سیلت لوم
۶۴.....	۳-۲-۱-۲-۴- برآورد آب قابل دسترس در بافت سیلت لوم
۶۶.....	۴-۲-۱-۲-۴- مقایسه بین رطوبت پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در بافت سیلت لوم
۷۳.....	۲-۲-۴- توابع انتقالی نقطه‌ای
۷۵.....	۱-۲-۲-۴- ایجاد توابع انتقالی
۷۶.....	۱-۱-۲-۲-۴- روش رگرسیونی
۸۰.....	۲-۱-۲-۲-۴- روش شبکه عصبی مصنوعی
۸۵.....	۳-۱-۲-۲-۴- مقایسه نتایج روش رگرسیونی و شبکه عصبی
۹۳.....	۳-۲-۴- توسعه تابع انتقالی پارامتریک (معادله ون‌گنوختن)
۹۴.....	۱-۳-۲-۴- روش رگرسیونی
۱۰۰.....	۲-۳-۲-۴- روش شبکه عصبی
۱۰۷.....	فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۱۰۸.....	۱-۵- نتیجه‌گیری
۱۰۸.....	۱-۱-۵- برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک در بافت لوم
۱۰۸.....	۲-۱-۵- برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک در بافت سیلت لوم
۱۰۹.....	۳-۱-۵- مقایسه نقطه‌ای رطوبت به روش رگرسیون (MLR) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN)
۱۰۹.....	۴-۱-۵- مقایسه توابع انتقالی نقطه‌ای رطوبت با تابع پارامتریک مدل ون‌گنوختن
۱۰۹.....	۲-۵- پیشنهادها
۱۱۰.....	پیوست‌ها
۱۱۴.....	منابع

فهرست جداول

- جدول ۳-۱- منطقه نمونه برداری شده بافت لوم و سیلت لوم ۳۳
- جدول ۳-۲- توزیع اندازه ذرات و خصوصیات فیزیکی نمونه خاک‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر ۳۴
- جدول ۳-۳- خصوصیات شیمیایی نمونه خاک‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر ۳۴
- جدول ۴-۱- مقادیر شاخص‌های آماری پنج مدل برآورد رطوبت در کلاس بافت لوم ۴۹
- جدول ۴-۲- مقادیر شاخص‌های آماری پنج برآورد رطوبت در کلاس بافت سیلت لوم ۶۲
- جدول ۴-۳- همبستگی بین پارامترهای فیزیکی و مقادیر رطوبت در پتانسیل ماتریک متفاوت ۷۳
- جدول ۴-۴- همبستگی بین پارامترهای شیمیایی و مقادیر رطوبت در پتانسیل ماتریک متفاوت ۷۴
- جدول ۴-۵- توابع انتقالی نقطه‌ای مرحله آموزش روش رگرسیون (پارامترهای فیزیکی) ۷۷
- جدول ۴-۶- توابع انتقالی نقطه‌ای مرحله آموزش روش رگرسیون (پارامترهای فیزیکی - شیمیایی) ۷۷
- جدول ۴-۷- توابع انتقالی نقطه‌ای مرحله آزمون روش رگرسیون (پارامترهای فیزیکی) ۷۹
- جدول ۴-۸- توابع انتقالی نقطه‌ای مرحله آزمون روش رگرسیون (پارامترهای فیزیکی - شیمیایی) ۷۹
- جدول ۴-۹- توابع انتقالی نقطه‌ای مرحله آموزش روش شبکه عصبی مصنوعی (پارامترهای فیزیکی) ۸۲
- جدول ۴-۱۰- توابع انتقالی نقطه‌ای مرحله آموزش روش شبکه عصبی مصنوعی پارامترهای فیزیکی - شیمیایی ۸۲
- جدول ۴-۱۱- توابع انتقالی نقطه‌ای مرحله آزمون روش شبکه عصبی مصنوعی (پارامترهای فیزیکی) ۸۴
- جدول ۴-۱۲- توابع انتقالی نقطه‌ای مرحله آزمون روش شبکه عصبی مصنوعی (پارامترهای فیزیکی - شیمیایی) ۸۴
- جدول ۴-۱۳- پارامترهای فیزیکی مرحله آموزش ۹۴
- جدول ۴-۱۴- پارامترهای فیزیکی - شیمیایی مرحله آموزش ۹۵
- جدول ۴-۱۵- پارامترهای فیزیکی مرحله آزمون ۹۵
- جدول ۴-۱۶- پارامترهای فیزیکی - شیمیایی مرحله آزمون ۹۵
- جدول ۴-۱۷- پارامترهای فیزیکی مرحله آموزش ۱۰۰
- جدول ۴-۱۸- پارامترهای فیزیکی - شیمیایی مرحله آموزش ۱۰۱
- جدول ۴-۱۹- پارامترهای فیزیکی مرحله آزمون ۱۰۱
- جدول ۴-۲۰- پارامترهای فیزیکی شیمیایی مرحله آزمون ۱۰۱
- جدول پ-۱- برنامه کامپیوتری محاسبه‌ی توابع نقطه‌ای به روش شبکه عصبی مصنوعی ۱۱۰
- جدول پ-۲- برنامه کامپیوتری محاسبه‌ی پارامترهای تابع ونگنوختن-RETC ۱۱۱
- جدول پ-۳- مقادیر رطوبت FC و PWP اندازه‌گیری شده بافت لوم ۱۱۳
- جدول پ-۴- مقادیر رطوبت FC و PWP اندازه‌گیری شده بافت لوم ۱۱۳

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲- منحنی نگهداشت آب در خاک (سیلرز و همکاران، ۲۰۰۱) ۱۱
- شکل ۱-۳- نقشه مختصات نقاط نمونه برداری ۳۲
- شکل ۲-۳- توزیع نمونه خاک‌های مورد مطالعه در این تحقیق در مثلث بافت خاک ۳۳
- شکل ۱-۴- منحنی نگهداشت رطوبتی خاک اندازه‌گیری شده و برآورد شده برای مجموعه خاک‌های لوم ۴۹
- شکل ۲-۴- مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا در برآورد رطوبت برای مدل درنر (۱۹۹۴)، ون گنوختن-Rosetta، ون- گنوختن-RETC، کمپل (۱۹۷۴) و بروکس-کوری (۱۹۶۴) در پتانسیل‌های ماتریک متفاوت (خاک لوم) ۵۱
- شکل ۳-۴- آب قابل دسترس برآورد شده و اندازه‌گیری شده نسبت به خط ۱:۱ در خاک لوم ۵۳
- (الف- مدل درنر و ب- مدل ون گنوختن-RETC، ج- بروکس-کوری، د- ون گنوختن-Rosetta، خ- مدل کمپل) ۵۳
- شکل ۴-۴- مقادیر مشاهداتی رطوبت حجمی در مقابل مقادیر تخمینی و پراکندگی نقاط به دست آمده در اطراف خط ۱:۱ ۵۹
- شکل ۵-۴- منحنی نگهداشت رطوبتی خاک اندازه‌گیری شده و برآورد شده برای خاک سیلت لوم ۶۲
- شکل ۶-۴- مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا برای مدل درنر (۱۹۹۴)، مدل ون گنوختن-RETC، مدل ون گنوختن- رزتا و بروکس و کوری در پتانسیل‌های ماتریک متفاوت (خاک سیلت لوم) ۶۴
- شکل ۷-۴- آب قابل دسترس برآورد شده و اندازه‌گیری شده نسبت به خط ۱:۱ در خاک سیلت لوم ۶۶
- (الف- مدل درنر و ب- مدل ون گنوختن-RETC، ج- مدل ون گنوختن-Rosetta، د- مدل بروکس-کوری و خ- مدل کمپل) ۶۶
- شکل ۸-۴- مقادیر مشاهداتی رطوبت حجمی در مقابل مقادیر تخمینی و پراکندگی نقاط به دست آمده در اطراف خط ۱:۱ ۷۲
- شکل ۹-۴- مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و برآورد شده پارامترهای فیزیکی با استفاده از بهترین مدل رگرسیون نسبت به خط ۱:۱ ۸۸
- شکل ۱۰-۴- مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و برآورد شده پارامترهای فیزیکی-شیمیایی با استفاده از بهترین مدل رگرسیون نسبت به خط ۱:۱ ۹۰
- شکل ۱۱-۴- مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و برآورد شده پارامترهای فیزیکی-شیمیایی با استفاده از بهترین مدل شبکه عصبی نسبت به خط ۱:۱ ۹۱
- شکل ۱۲-۴- مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و برآورد شده پارامترهای فیزیکی با استفاده از بهترین مدل شبکه عصبی نسبت به خط ۱:۱ ۹۳
- شکل ۱۳-۴- مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و برآورد شده پارامترهای فیزیکی با استفاده از بهترین مدل رگرسیون نسبت به خط ۱:۱ ۹۸
- شکل ۱۴-۴- مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و برآورد شده پارامترهای فیزیکی-شیمیایی با استفاده از بهترین مدل رگرسیون نسبت به خط ۱:۱ ۹۹

شکل ۴-۱۵- مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و برآورد شده با استفاده از پارامتر ون‌گنوختن، پارامترهای فیزیکی
تأثیرگذار با استفاده از بهترین مدل شبکه عصبی نسبت به خط ۱:۱..... ۱۰۳

شکل ۴-۱۶- مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و برآورد شده پارامترهای فیزیکی- شیمیایی با استفاده از بهترین مدل
شبکه عصبی نسبت به خط ۱:۱..... ۱۰۵

فصل ۱ : مقدمه

۱-۱-۱ - منحنی نگهداشت رطوبتی خاک و اهمیت آن در بخش‌های مختلف

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های هیدرولیکی موردنیاز در شبیه‌سازی جریان آب و املاح در پروفیل خاک که اهمیت پایه‌ای در فیزیک خاک نیز دارد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک است (اسلام و همکاران، ۲۰۰۶، ذوالفقاری و همکاران، ۱۳۹۲). منحنی نگهداشت رطوبتی خاک، توانایی ذخیره و آزادسازی آب توسط خاک را نشان می‌دهد و اهمیت زیادی در کشاورزی و روابط آب خاک گیاه دارد. افزون بر این، اطلاعات نگهداشت آب خاک برای تعیین مقدار رطوبت قابل‌دسترس خاک و برنامه‌ریزی آبیاری نیز موردنیاز است. منحنی نگهداشت رطوبتی خاک به عواملی چون بافت خاک، ساختمان خاک، توزیع اندازه خلل و فرج خاک وابسته است. اگر به خاک اشباع مکش کمی وارد شود آب از خاک خارج نمی‌شود، مگر این‌که مکش وارد شده از یک مقدار مشخصی افزایش یابد. در این حالت تخلیه آب از بزرگ‌ترین منافذ آغاز می‌شود. این مکش مشخص، مکش ورود هوا نام دارد. در خاک‌های درشت‌بافت پدیده ورود هوا سریع‌تر از خاک‌های ریزبافت انجام می‌شود. وقتی که مکش بیشتر شود آب بیشتری از خاک خارج می‌شود و غالباً منافذ نسبتاً بزرگ که در برابر مکش اعمال شده نمی‌توانند آب را در خود نگه دارد، خالی خواهند شد. با فرض صفر بودن زاویه تماس بین آب و دیواره منافذ خاک، با استفاده از معادله مویبندی به‌آسانی می‌توان پیش‌بینی کرد که افزایش تدریجی مکش منجر به خالی شدن پیوسته خلل و فرج ریزتر خاک می‌گردد تا جایی که در مقادیر مکش زیاد فقط خلل و فرج بسیار باریک آب را در خود نگه می‌دارند. همچنین افزایش مکش با کاهش ضخامت پوشش آب سطح ذرات خاک همراه است. مقدار رطوبت خاک در حالت تعادل تابعی از اندازه و حجم خلل و فرج پر از آب و بنابراین تابعی از مکش ماتریک است. معمولاً این تابع به صورت تجربی اندازه‌گیری می‌شود و توسط منحنی نگهداشت رطوبتی خاک رسم می‌گردد (هیلل، ۱۹۹۸). در مکش‌های پایین (۱-۰ اتمسفر)، منحنی نگهداشت رطوبتی خاک بیشتر تحت تأثیر توزیع اندازه منافذ و ساختمان خاک است، زیرا در این محدوده از مکش مقدار رطوبت در

خاک به نیروهای موینگی که تابعی از اندازه منافذ خاک است بستگی دارد. از طرفی، در نیروی مکش زیاد (دنباله خشک منحنی نگهداشت رطوبتی خاک)، نگهداشت رطوبت توسط خاک تابعی از نیروهای جذب سطحی بوده و در نتیجه در مکش‌های بالا، بافت و سطح ویژه خاک عواملی مهم‌تر به شمار می‌آیند (عباسی، ۱۳۸۷). افزون بر این، منحنی نگهداشت رطوبتی خاک تحت تأثیر ویژگی‌هایی دیگر از خاک از جمله مقدار و نوع رس خاک، درصد مواد آلی و ترکیب آن، تراکم و جرم مخصوص ظاهری خاک، ترکیب و غلظت محلول خاک قرار دارد. مقدار و نوع رس خاک تأثیر زیادی بر منحنی نگهداشت رطوبتی خاک دارند، به گونه‌ای که در خاک‌های رسی شیب منحنی نگهداشت رطوبتی خاک ملایم و تدریجی است. در این خاک‌ها توزیع خلل و فرج یکنواخت‌تر بوده و بیشتر رطوبت جذب سطحی ذرات خاک می‌شود. این در حالی است که در خاک‌های شنی به دلیل وجود خلل و فرج درشت، بخش عمده رطوبت با اعمال مکش معینی به صورت آبی تخلیه شده و بنابراین شیب منحنی نگهداشت رطوبتی خاک تندتر است.

۱-۲ - اندازه‌گیری منحنی نگهداشت رطوبتی خاک

برای تعیین منحنی نگهداشت رطوبتی خاک روش‌های مستقیم و غیرمستقیم پیشنهاد شده است. جهت اندازه‌گیری مستقیم منحنی نگهداشت رطوبتی خاک، برخی اندازه‌گیری‌ها در آزمایشگاه بر روی نمونه‌های دست‌خورده یا دست‌نخورده و پاره‌ای نیز در صحرا و در شرایط طبیعی انجام می‌شود. با وجود پیشرفت‌هایی که در روش‌های مستقیم اندازه‌گیری منحنی نگهداشت رطوبتی خاک صورت گرفته، این روش‌ها همچنان پرزحمت، پرهزینه و زمان‌بر است. این در حالی است که منحنی نگهداشت رطوبتی خاک دارای تغییرپذیری زمانی و مکانی قابل توجهی بوده که برای رفع این مشکل نمونه‌برداری‌هایی فراوان و به دنبال آن آزمایش‌های زیادی نیز باید انجام گیرد. (طلوعی، ۱۳۹۴).

۱-۳ - اندازه‌گیری غیرمستقیم منحنی نگهداشت رطوبتی خاک

با توجه به مشکلات اندازه‌گیری‌های مستقیم منحنی نگهداشت رطوبتی خاک، روش‌های غیرمستقیم که بسیار ارزان بوده و به‌آسانی قابل استفاده است، در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در روش‌های غیرمستقیم ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را با استفاده از دیگر ویژگی‌های خاک برآورد می‌کنند. یکی از این روش‌های غیرمستقیم استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، تحلیل این داده‌ها و تعمیم آن‌ها به خاک‌هایی با شرایط مشابه از نظر بافت و ساختمان است. شایان ذکر است که در این روش برآوردی دقیق از منحنی نگهداشت رطوبتی خاک صورت نمی‌گیرد. روش دیگر، اشتقاق منحنی نگهداشت رطوبتی خاک از مدل‌های فیزیکی - تجربی بوده که بر اساس ساده‌سازی جریان در محیط‌های متخلخل ایجاد شده‌اند. از دیگر روش‌های غیرمستقیم اندازه‌گیری منحنی نگهداشت رطوبتی خاک روش معکوس است. در این روش با بهره‌گیری از داده‌های حاصل از آزمایش (داده‌های مشاهداتی) و با استفاده از تکنیک به حداقل رساندن مجموع مربعات خطا بر اساس الگوریتم‌های بهینه‌سازی، مقادیر ضرایب معادله مورد نظر پیش‌بینی می‌شود. لذا، در این روش به تعدادی اندازه‌گیری و داده‌های اولیه نیاز است. روش غیرمستقیم دیگر که جایگزین روش‌های مستقیم شده است، استفاده از مدل‌های تجربی محض بوده که نگهداشت آب خاک را با بهره‌گیری از داده‌های موجود خاک پیش‌بینی می‌کنند. تخمین منحنی نگهداشت رطوبتی خاک با استفاده از داده‌های موجود خاک که به‌وسیله معادلات رگرسیونی انجام می‌شود، توابع انتقالی خاک نامیده می‌شود (بوما، ۱۹۸۹). توابع انتقالی را می‌توان برآورد کننده ویژگی‌های دیرپافت خاک از ویژگی‌های زودپافت خاک نامید. ویژگی‌های دیرپافت خاک ویژگی‌هایی از خاک است که اندازه‌گیری آن‌ها به‌وسیله روش‌های مستقیم مستلزم صرف وقت زیاد، هزینه بالا و کار پرهزینه است. این در حالی است که این ویژگی‌ها در مدل‌سازی و کارهای مدیریتی منابع آب و خاک مورد نیاز است. منحنی نگهداشت رطوبتی خاک و هدایت آبی اشباع و غیراشباع از جمله ویژگی‌های دیرپافت خاک می‌باشند. ویژگی‌های زودپافت خاک خصوصیات از خاک بوده که اندازه‌گیری آن‌ها آسان و ارزان بوده و به‌طور معمول در مطالعه‌ها و گزارش‌های خاک‌شناسی ثبت می‌شوند (رضوی قلعه جوق، ۱۳۹۳). به‌رغم

این که استفاده از توابع انتقالی در سال‌های اخیر گسترش فراوانی یافته، لیکن در استفاده از یک تابع برای منطقه دیگر محدودیت‌هایی وجود دارد. از سوی دیگر توابع انتقالی را با توجه به نحوه برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک نیز می‌توان به دو گروه توابع انتقالی نقطه‌ای و پارامتریک تقسیم‌بندی کرد. توابع انتقالی نقطه‌ای با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه یا شبکه عصبی مصنوعی مقدار رطوبت را در پتانسیل‌های معین برآورد می‌کنند که عموماً دونقطه ظرفیت مزرعه و پژمردگی دائم می‌باشند. این توابع برآورد دقیقی برای نقاط مشخصی از منحنی نگهداشت رطوبتی خاک به همراه دارد. همچنین این توابع مهم‌ترین ویژگی خاک را که در برآورد مقدار رطوبت درمکش معین نقش دارد مشخص می‌کند. توابع انتقالی پارامتریک هر یک از پارامترهای مربوط به توابع هیدرولیکی را برآورد می‌کنند و برای ایجاد آن از رگرسیون خطی و غیرخطی و شبکه عصبی مصنوعی استفاده می‌شود. در این توابع فرض شده که رابطه رطوبت و پتانسیل ماتریک بر اساس یک مدل هیدرولیکی مانند مدل ون‌گونوختن قابل بیان است (طلوعی، ۱۳۹۴).

۴-۱ - ضرورت و اهمیت موضوع

با توجه به این که در مناطق خشک و نیمه‌خشک و در بخش وسیعی از اراضی تحت کشت کشورمان مشکل کمبود آب وجود دارد، برآورد فراهمی آب خاک با ایجاد توابع انتقالی مناسب در اراضی تحت کشت با صرف وقت و هزینه کمتر ضروری است. از طرفی تشدید فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی موجب کاهش کیفیت خاک و آب شده است. جهت بررسی این کاهش کیفیت، مدل‌های تجربی و ریاضی بسیاری برای شبیه‌سازی حرکت آب در منطقه اشباع و غیراشباع خاک ارائه شده است. در این رابطه بررسی کمی مقدار رطوبت و هدایت آبی خاک برای مطالعه و مدل‌سازی حرکت آب و املاح در خاک حائز اهمیت است. تلاش‌های زیادی به منظور یافتن شیوه‌های ساده و ارزان جهت شناسایی روابط منطقی و عملی بین رطوبت خاک و پتانسیل ماتریک انجام شده است. این مسئله هنگامی که نقاط رطوبتی مهم مانند ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم مطرح است، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از آنجاکه خصوصیات

هیدرولیکی خاک دارای توزیع مکانی و زمانی بسیار متغیری هستند، بنابراین تعیین این خصوصیات برای هر منطقه به صورت مجزا لازم و ضروری است. با توجه به موقعیت استراتژیک شهرستان شاهرود از نقطه نظر موقعیت جغرافیایی و با توجه به محدودیت منابع آب و وقوع خشک‌سالی‌های اخیر در منطقه مذکور، تنظیم و کنترل برنامه‌ریزی‌های آبیاری نقش مهمی در مدیریت منابع آب خواهد داشت. این موضوع زمانی اهمیت دوچندان خواهد داشت که بدانیم کشاورزی شغل اصلی ساکنین منطقه مورد مطالعه است. زمین‌های کشاورزی و باغی به ترتیب ۲۴ و ۳۲ درصد از اراضی منطقه مورد مطالعه را تشکیل داده است.

۱-۵ - اهداف تحقیق

الف - تخمین منحنی نگهداشت رطوبتی خاک با استفاده از توابع انتقالی پارامتریک و بررسی کارایی هریک از آنها

ب - تخمین منحنی نگهداشت رطوبتی خاک با استفاده از توابع انتقالی نقطه‌ای با دو روش رگرسیون خطی چندگانه و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و بررسی کارایی هریک از آنها جهت انتخاب مدل بهینه

ج - تعمیم مدل ون گنوختن-RETC با استفاده از روش رگرسیون خطی چندگانه و روش شبکه عصبی مصنوعی جهت انتخاب روش بهینه

۱-۶ - روش انجام تحقیق

در این تحقیق از توابع انتقالی نقطه‌ای و پارامتریک به منظور برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک در مزارع کشاورزی شهرستان بسطام استفاده گردید. به منظور بسط توابع انتقالی از تکنیک رگرسیون چندگانه خطی و شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. پارامترهای ورودی این مدل‌ها شامل بافت خاک، جرم مخصوص ظاهری، ماده آلی، تخلخل، آهک، کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، شاخص انبساط آزاد

خاک، نسبت جذب سدیم، PH و EC بودند که در آزمایشگاه آب و خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود در حدفصل بازه زمانی مهر ۹۶ و آبان ۹۷ اندازه‌گیری شدند.

۷-۱ - ساختار پایان‌نامه

این تحقیق در پنج فصل به شرح زیر تهیه شده است:

در فصل اول تعریف منحنی نگهداشت رطوبتی خاک و اهمیت آن، روش‌های اندازه‌گیری منحنی نگهداشت رطوبتی، ضرورت انجام تحقیق، هدف از انجام تحقیق و روش انجام تحقیق بیان شده است. فصل دوم شامل کلیاتی در مورد منحنی نگهداشت رطوبتی، نقاط مهم در منحنی نگهداشت رطوبت خاک، کاربرد منحنی نگهداشت رطوبتی، عوامل تأثیرگذار، مدل‌سازی منحنی نگهداشت رطوبتی خاک و در انتها پیشینه تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. فصل سوم به بیان موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی، جمع‌آوری داده‌ها و آزمایش‌های اندازه‌گیری شده، معرفی مدل‌ها، معرفی نرم‌افزارهای مورد استفاده و در انتها به بیان شاخص‌های آماری جهت ارزیابی نتایج توابع انتقالی پرداخته می‌شود. در فصل چهارم به تحلیل توابع انتقالی پرداخته شده است. در فصل پنجم نتایج به دست آمده از تحلیل توابع انتقالی پارامتریک و نقطه‌ای به همراه پیشنهادهایی برای رسیدن به نتایج بهتر ارائه شده است. در انتها نیز منابع مورد استفاده در این تحقیق آمده است.

فصل ۲ : کلیات و بررسی منابع

۱-۲ - اصول فیزیکی حاکم بر جریان آب و خاک

معادله‌ی اساسی حاکم بر جریان آب در خاک، به معادله‌ی ریچاردز معروف است که از تلفیق قانون دارسی با اصل بقای جرم به دست می‌آید. این معادله، یک معادله دیفرانسیل سهموی است (کائو و یوآ، ۲۰۱۴) که به جز در شرایط خاص، راه‌حل تحلیلی برای آن وجود ندارد و حل آن به روش عددی امکان‌پذیر است. معادله‌ی ریچاردز برای جریان یک‌بعدی عمودی به صورت زیر است:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial k(h)}{\partial z} \quad (1-2)$$

در معادله‌ی فوق:

θ : رطوبت حجمی (بدون بعد)

$k(h)$: هدایت هیدرولیکی خاک غیراشباع (L/T)

h : پتانسیل ماتریک خاک (L)

Z : مختصات مکان در جهت عمودی (L)

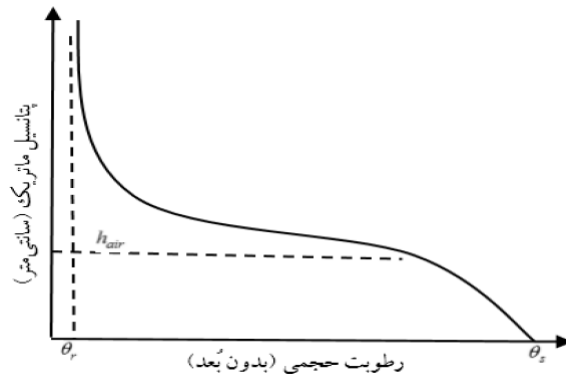
t : مختصات زمان (T)

در این معادله، تغییرات رطوبت، مکش ماتریک و هدایت هیدرولیکی مجهول است. برای حل معادله با سه مجهول، باید دو معادله‌ی تحلیلی نوشته شود. یکی از معادلات مربوط به منحنی نگهداشت آب در خاک و دیگری مربوط به منحنی تغییرات هدایت هیدرولیکی است (اصغرزاد دانش، ۱۳۹۲). بنابراین، به دست آوردن منحنی نگهداشت آب در خاک، یا به عبارتی معادله‌ی ریاضی حاکم بر منحنی، در فرآیند مطالعه‌ی جریان غیراشباع ضروری است.

۲-۲ - منحنی نگهداشت آب در خاک

منحنی نگهداشت آب در خاک از خصوصیات فیزیکی مهم خاک است که رطوبت حجمی خاک را در مقادیر مختلف مکش نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است، شکل کلی این

منحنی سیگموئیدی بوده و نشان می‌دهد که رابطه‌ی بین مکش ماتریک و رطوبت حجمی به صورت معکوس است.



شکل ۱-۲ منحنی نگهداشت آب در خاک (سیلرز و همکاران، ۲۰۰۱)

θ_s : رطوبت حجمی اشباع (L^3L^{-3})

θ_r : رطوبت حجمی باقی مانده (L^3L^{-3})

h_{air} : مکش ورود هوا (L)

۳-۲ - نقاط مهم در منحنی نگهداشت رطوبتی خاک

در محدوده بین خاک اشباع تا خاک خشک بی‌نهایت حالات مختلف وجود دارد که گیاه با آن مواجه است؛ اما در این بازه رطوبتی نقاط مختلفی هستند که از نظر کاربردی و فیزیک خاک اهمیت زیاد دارند که از آن‌ها به عنوان نقاط پتانسیلی مهم خاک نام برده می‌شود. این نقاط پتانسیلی عبارت‌اند از:

۱-۳-۲ - ظرفیت زراعی (FC)

ظرفیت زراعی حد بالای آب قابل‌استفاده بوده و مقدار آبی است که پس از خروج آب ثقلی در خاک نگهداری می‌شود به همین دلیل ظرفیت زراعی را گنجایش نگهداری آب در خاک نیز می‌گویند (امیر عابدی، ۱۳۹۲).

۲-۳-۲ - نقطه پژمردگی دائم (PWP)

رطوبت خاک زمانی در نقطه پژمردگی است که گیاه قادر به جذب آب از آن نباشد. در نقطه پژمردگی کلیه آب موجود در منافذ درشت و نیز قسمتی از آب غشایی که به اطراف ذرات خاک چسبیده است از آن خارج شده است. در مورد اغلب گیاهان این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که مکش خاک حدود ۱۵ اتمسفر باشد. باید توجه داشت که رشد گیاه عملاً قبل از این که رطوبت خاک به این حد برسد متوقف می‌شود (علیزاده، ۱۳۹۰).

۳-۳-۲ - آب قابل دسترس (PAW)

مقدار رطوبتی که بین دو حد ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دائم وجود دارد، رطوبت قابل دسترس نامیده می‌شود (بای بوردی، ۱۳۸۲).

۴-۳-۲ - آب سهل الوصول (RAW)

آب سهل الوصول نسبتی از حد بالای آب قابل استفاده گیاه در خاک می‌باشد که به راحتی قابل جذب بوده و گیاه در آن دچار تنش رطوبتی نشده و در نتیجه حداکثر رشد و عملکرد را خواهد داشت (علیزاده، ۱۳۹۰).

۵-۳-۲ - مکش ورود هوا (AEV)

مکش ورود هوا مکشی است که اولین قطره آب در اثر اعمال مکش به خاک اشباع خارج و هوا جایگزین آن می‌شود. از این نقطه به بعد خاک در حالت غیراشباع است. مقدار این مکش در خاک‌های درشت‌بافت و خاکدانه‌ای کم است. از آنجاکه اندازه خلل و فرج خاک‌هایی با بافت درشت، اغلب یکنواخت است، این خاک‌ها پدیده ورود هوا را به‌طور مشخص‌تر نسبت به خاک‌هایی با بافت ریزتر نشان می‌دهند (بای بوردی، ۱۳۸۸؛ برزگر، ۱۳۸۰).

۴-۲ - کاربردهای منحنی نگهداشت رطوبتی خاک

- منحنی نگهداشت رطوبتی خاک اهمیت پایه‌ای در فیزیک خاک داشته و برای بسیاری از پژوهش‌های مرتبط با روابط آب و خاک ضروری است (راولز و همکاران، ۱۹۹۱، سیلرز و همکاران، ۲۰۰۱، دکستر و همکاران، ۲۰۰۸). از مهم‌ترین کاربردهای این منحنی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:
- ۱- تعیین مقدار آب قابل دسترس (PAW) و آب سهل‌الوصول (RAW) خاک برای گیاه
 - ۲- حل معادله جریان آب در خاک به‌ویژه در شرایط غیراشباع.
 - ۳- برای مدل‌سازی جریان غیراشباع نمک‌ها و آلاینده‌ها در خاک.
 - ۴- تعیین تابع هدایت هیدرولیکی خاک.
 - ۵- تعیین مقدار رطوبت با داشتن مکش ماتریک خاک و بالعکس.
 - ۶- ارزیابی پایداری ساختمان خاک.
 - ۷- ارزیابی اثر مدیریت‌های مختلف بر خاک.
 - ۸- تعیین توزیع اندازه منافذ خاک.

۵-۲ - عوامل مؤثر بر شکل منحنی رطوبتی

از جمله عوامل مؤثر بر منحنی نگهداشت رطوبتی خاک می‌توان به پدیده پسماند، بافت، ساختمان خاک، تخلخل، شکل خلل و فرج خاک، تراکم خاک، درجه حرارت و املاح موجود در خاک اشاره کرد. هر چه مقدار رس در خاک بیشتر باشد، مقدار رطوبت موجود در مکش معین بیشتر است. تغییرات شیب منحنی نگهداشت رطوبتی خاک در خاک‌های رسی تدریجی است، در خاک‌های شنی به دلیل وجود خلل و فرج درشت، این تغییرات شیب، ناگهانی است. منحنی نگهداشت رطوبتی خاک در مکش‌های کم، به‌طور عمده تابع ساختمان خاک است اما در مکش‌های زیاد تحت تأثیر بافت خاک قرار می‌گیرد. این منحنی به دلیل متأثر بودن از نیروهای جاذبه بین ذرات و شکل خلل و فرج خاک حتی برای خاک خاص به قدری پیچیده است که هیچ رابطه ریاضی رضایت‌بخشی برای پیش‌بینی آن ارائه نشده است. شکل این منحنی نه‌تنها

برای خاک‌هایی با بافت مختلف، متفاوت است، بلکه حتی در یک نوع بافت خاک نیز بسته به این که خاک فشرده یا دانه‌ای باشد، شکل منحنی تغییر می‌کند (علیزاده، ۱۳۸۳).

۲-۶ - مدل‌سازی منحنی رطوبتی خاک

منحنی نگهداشت رطوبتی خاک به دو روش مستقیم (آزمایشگاهی و مزرعه‌ای) و غیرمستقیم قابل اندازه‌گیری است که هر کدام از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارند (رمضانی، ۱۳۹۲). با وجود پیشرفت‌های زیادی که در زمینه‌ی روش‌های آزمایشگاهی و مزرعه‌ای انجام گرفته است، این روش‌ها وقت‌گیر، هزینه‌بر و خسته‌کننده‌اند از این رو نیاز به روش‌های غیرمستقیم برای مدل‌سازی منحنی نگهداشت رطوبتی خاک اجتناب‌ناپذیر است. در مدل‌سازی منحنی نگهداشت رطوبتی خاک، این منحنی را به‌طور فرضی به سه ناحیه تقسیم می‌کنند:

۲-۶-۱ - ناحیه ورود هوا یا ناحیه اشباع مؤئینه‌ای

در این ناحیه تغییرات مقدار رطوبت خاک با افزایش مکش ماتریک اندک بوده و با وجود ایجاد مکش، خاک به دلیل نیروهای مؤئینه هنوز اشباع باقی می‌ماند. این ناحیه از یک طرف به مکش صفر یا رطوبت اشباع و از طرف دیگر به مکش ورود هوا (Air-entry value) ختم می‌شود (سیلرز و همکاران، ۲۰۰۱).

۲-۶-۲ - ناحیه غیر اشباع یا ناحیه تحت مکش

در این ناحیه خاک غیر اشباع بوده و منحنی نگهداشت رطوبتی خاک دارای شیب زیادی است. این ناحیه از یک طرف به مکش ورود هوا و از طرف دیگر به رطوبت باقی‌مانده خاک محدود می‌شود. شیب منحنی نگهداشت رطوبتی در این ناحیه بیشترین است، یعنی بیش‌ترین آبدهی یا آبدگیری خاک در این ناحیه انجام می‌گیرد. بنابراین رطوبت باقی‌مانده، حداکثر مقدار آب در خاک است که عملاً ساکن است و به دلیل بسته شدن مسیرهای جریان یا جذب سطحی شدید آب بر روی ذرات جامد، در حرکت آب

به صورت مایع نقشی ندارد. بنابراین باید توجه داشت که رطوبت باقی مانده لزوماً برابر با کمترین مقدار رطوبت ممکن در خاک‌های طبیعی نیست (سیلرز و همکاران، ۲۰۰۱).

۲-۶-۳ - ناحیه جذب سطحی یا ناحیه اشباع باقی مانده

ناحیه جذب سطحی از یک طرف به رطوبت باقی مانده و از طرف دیگر به رطوبت صفر محدود می‌شود. جریان مایع در این ناحیه بسیار ناچیز بوده و جریان به صورت بخار صورت می‌گیرد. البته جریان پوسته‌ای یا لایه‌ای آب ممکن است به مقدار محدود در این ناحیه وجود داشته باشد. شیب این ناحیه از منحنی نیز ناچیز و نزدیک صفر است. اعتقاد کلی بر این است که هدایت هیدرولیکی خاک نیز در این ناحیه ناچیز است. آب این ناحیه اثر چندانی بر ویژگی‌های هیدرولیکی و مکانیکی خاک نداشته و نیروهای جذب سطحی در نگهداری آن نقش مهمی ایفا می‌کنند (سیلرز و همکاران، ۲۰۰۱).

۲-۷ - مروری بر پژوهش‌های انجام شده

افراسیاب، در تحقیق خود اقدام به واسنجی مدل کمپل نمود و نتیجه گرفت که مدل در مکش‌های پایین، دقیق‌تر از مکش‌های بالا عمل می‌نماید. همچنین از آنجایی که مدل کمپل بر نقاط ابتدایی و انتهای منحنی تطابق بهتری داشت، استفاده از این مدل را برای پیش‌بینی مقدار رطوبت در دونقطه ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم توصیه کرد (افراسیاب، ۱۳۸۰).

رضایی و همکاران، به ارزیابی مدل کمپل در خاک‌های دشت سراب ایران پرداختند و نتایج آزمایشگاهی منحنی نگهداشت رطوبتی خاک را با مدل فیزیکی تجربی کمپل مقایسه کردند. در نهایت مشخص شد که نتایج آزمایشگاهی با نتایج به دست آمده از مدل کمپل تفاوت معنی‌داری ندارد و استفاده از مدل کمپل را توصیه کردند (رضایی و همکاران، ۱۳۸۰).

قربانی، طی پژوهشی نشان داد که برای برآورد پارامترهای معادله ون گنوختن استفاده از میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات مناسب‌تر از فراوانی نسبی ذرات است (قربانی، ۱۳۸۱).

خداوردی لو و همایی، در مطالعه‌ای از توابع انتقالی برای پیش‌بینی منحنی نگهداشت رطوبتی در خاک- های آهکی استفاده کرده و نتایج آن را با مدل رزتا مقایسه نمودند. نتایج نشان داد توابع انتقالی به‌دست‌آمده مقدار رطوبت را در نقطه ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دائم بهتر از رزتا تخمین می‌زند (خداوردی لو و همایی، ۱۳۸۳).

فیروزی و همایی، با استفاده از توابع انتقالی نقطه‌ای، منحنی نگهداشت رطوبتی خاک را در پتانسیل‌های ۱۰، -۱۰۰، -۵۰۰ و -۱۵۰۰ کیلوپاسکال در خاک‌های گچی برآورد کردند. به همین منظور ۳۵ نمونه خاک دارای $\frac{3}{8}$ تا $\frac{32}{7}$ درصد گچ را انتخاب نمودند. ویژگی‌های زود یافت خاک به‌منظور اشتقاق توابع انتقالی شامل جرم ویژه ظاهری، مقدار گچ و توزیع اندازه ذرات بود. به همین منظور ویژگی‌های زود یافت خاک به دودسته تقسیم شدند. گروه اول شامل توزیع اندازه ذرات، جرم ویژه ظاهری و مقدار گچ بود. گروه دوم شامل جرم ویژه ظاهری، انحراف معیار هندسی قطر ذرات و مقدار گچ بود. این پژوهشگران برای اشتقاق توابع انتقالی موردنظر از رگرسیون خطی چندگانه به روش گام‌به‌گام استفاده کردند. مقایسه نتایج نشان داد که متغیرهای گروه اول برآورد بهتری از نگهداشت رطوبتی در پتانسیل‌های موردنظر دارد. همچنین مشخص شد که مقدار گچ، دومین عامل برآورد کننده رطوبت در پتانسیل‌های موردبررسی برای خاک‌های گچی است (فیروزی و همایی، ۱۳۸۴).

ترابی فارسی و قهرمان، کارایی چهار مدل رالز و براکنسیک (۱۹۸۲)، وریکن و همکاران (۱۹۸۹)، وستن و همکاران (۱۹۹۹) و مدل‌های داخلی دشتکی و همایی (۲۰۱۰)، فرخیان فیروزی و همایی (۱۳۸۴) را در برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک‌های گچی بررسی کردند و از آنجایی که نتایج به‌دست‌آمده چندان مطلوب نبودند، بر لزوم تهیه توابع انتقالی مناسب برای خاک‌های گچی و آهکی ایران تأکید کردند (ترابی فارسی و قهرمان، ۱۳۸۶).

کشکولی و همکاران، نشان دادند که شبکه عصبی در برآورد داده‌های منحنی خاک با استفاده از داده‌های ورودی محدود و سهل‌الوصول (اندازه ذرات خاک و داده‌های رطوبت خاک) دارای قابلیت نسبتاً بالایی است (کشکولی و همکاران، ۱۳۸۷).

موذن‌زاده و همکاران، در بررسی تأثیر نوع و تعداد متغیرهای ورودی در برنامه رزتا بر روی برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک‌های شمال کشور در دو کلاس بافت لوم و لوم رسی دریافتند که افزوده شدن جرم مخصوص ظاهری به متغیرهای ورودی توابع انتقالی، در هر دو کلاس بافتی منجر به کاهش دقت مدل شده، هرچند این کاهش در هیچ‌کدام از دو کلاس بافتی معنی‌دار نبوده است (موذن‌زاده و همکاران، ۱۳۸۷).

موذن‌زاده و همکاران، عملکرد سه تابع انتقالی شامل مدل‌های اول و دوم قربانی و همایی (۱۳۸۱) و مدل سپاسخواه و بندار (۲۰۰۲) را در برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی در نمونه‌هایی از خاک‌های شمالی کشور باهم مقایسه کردند. نتایج نشان داد که در مرحله ارزیابی توابع موجود، مدل‌های اول و دوم قربانی و همایی در برآورد رطوبت در تمام بازه پتانسیل ماتریک، یکسان و تقریباً مناسب عمل کردند، ولی تابع سپاسخواه و بندار برآورد مناسبی نداشتند (موذن‌زاده و همکاران، ۱۳۸۸).

رضوی و همکاران، جهت مقایسه عملکرد مدل‌های ون گنوختن، بروکس و کوری، کمپل و هاتسون - کاس در شبیه‌سازی منحنی نگهداشت رطوبتی خاک، ۱۰ نمونه خاک از شهرستان نقده را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل هاتسون - کاس مناسب‌ترین عملکرد و بالعکس مدل ون گنوختن ضعیف‌ترین عملکرد را در شبیه‌سازی منحنی نگهداشت رطوبتی خاک برای منطقه مورد مطالعه دارد. مدل بروکس و کوری توانایی بیشتری نسبت به مدل کمپل در شبیه‌سازی منحنی نگهداشت رطوبتی خاک در این منطقه دارا است (رضوی و همکاران، ۱۳۸۹).

زکی زاده و همکاران، در بررسی توانایی تابع انتقالی راولز و براکنسیک و نرم افزار سویل پار ۲ و رزتا با ماهیت شبکه عصبی برای شبیه سازی منحنی نگهداشت رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک جهت به دست آوردن پارامترهای معادلات بروکس و کوری، کمپل، هاتسون و کاس و ون گنوختن، نشان دادند که معادله کمپل که ضرائب آن با نرم افزار سویل پار ۲ برآورد شده بیشترین تطابق را با مقادیر اندازه گیری شده منحنی نگهداشت رطوبتی خاک دارد و به طور کلی تابع انتقالی راولز برای مدل هدایت هیدرولیکی غیراشباع معلم ون گنوختن خطای کمتری داشته است (زکی زاده و همکاران، ۱۳۸۹).

خداوردی لو و همکاران، توابع انتقالی پارامتریک استوار بر معادله ون گنوختن را در خاک های آهکی اطراف کرج مورد ارزیابی قراردادند. ایشان متوسط ریشه میانگین خطا را برابر با ۰/۱۰۷ بین رطوبت های اندازه گیری شده و پیش بینی شده در مکش های مختلف به دست آوردند. ایشان همچنین ذکر نمودند که تابع انتقالی پارامتریک دقت مناسبی در برآورد رطوبت قابل استفاده خاک ها ندارد (خداوردی لو و همکاران، ۱۳۹۰).

فولادمند و هادی پور، در تحقیق خود ۱۲ تابع پارامتریک برای مدل های بروکس و کوری، کمپل و ون گنوختن را به کمک ۳۰ نمونه خاک با بافت های مختلف در استان فارس مورد ارزیابی قراردادند، نتایج نشان داد که توابع پارامتریک مدل ون گنوختن مناسب تر از توابع انتقالی پارامتریک دو مدل دیگر است (فولادمند و هادی پور، ۱۳۹۰).

شیرانی و رفیع نژاد، با برآورد برخی ویژگی های دیریافت خاک های استان کرمان با استفاده از توابع انتقالی رگرسیون و شبکه عصبی مصنوعی دریافتند که دقت روش شبکه عصبی نسبت به روش رگرسیونی بیشتر بوده است. نتایج نشان داد که اگر تعداد ویژگی های زودیافت خاک اندازه گیری شده زیاد نباشند، می توان از مدل های رگرسیونی با دقت قابل قبولی استفاده کرد. دقت مدل شبکه عصبی با کاهش تعداد پارامترهای زودیافت کاهش یافت (شیرانی و رفیع نژاد، ۱۳۹۰).

نبی زاده و هرچگانی، عملکرد هفت مدل مختلف منحنی نگهداشت رطوبتی خاک را در خاک‌های دشت لردگان با استفاده از نرم‌افزار SWRC¹ و با دو شاخص آماری RMSE و R² مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که نمونه خاک‌های مدل ون‌گنوختن (۱۹۸۰) با مقادیر R² بین ۰/۹۰ تا ۱/۰ و مقادیر RMSE بین ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۲۱ به‌عنوان بهترین و مدل بروکس و کوری با مقادیر R² بیشتر از ۰/۹۰ و مقادیر RMSE بین ۰/۰۰۹ تا ۰/۰۳۶ به‌عنوان ضعیف‌ترین مدل است (نبی زاده و هرچگانی، ۱۳۹۰).

مرادی و همکاران، امکان برآورد نقطه‌ای و پارامتریک منحنی نگهداشت رطوبتی خاک را با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه در استان خوزستان مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که همبستگی معنی‌داری بین داده‌های اندازه‌گیری و برآوردی با استفاده از توابع نقطه‌ای وجود دارد. همچنین نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که برآوردهای پارامتریک با دقتی بیش از برآوردهای نقطه‌ای، منحنی نگهداشت رطوبتی خاک را تخمین می‌زند (مرادی و همکاران، ۱۳۹۰).

جلیل‌وند و فرهادی، در ارزیابی توابع انتقالی داخلی در برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک‌های منطقه ماهیدشت به این نتیجه دست یافتند که تابع سپاسخواه اصلاح‌شده، بهترین تابع برای تخمین منحنی نگهداشت رطوبتی خاک منطقه مورد مطالعه است (جلیل‌وند و فرهادی، ۱۳۹۱).

بلیانی و همکاران، در پژوهش خود نقاط شاخص منحنی نگهداشت رطوبتی خاک مانند ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دائم و درنهایت رطوبت قابل‌استفاده با کمک مدل شبکه عصبی از نوع MLP^۲ با سه نوع تابع فعال‌سازی و همچنین روش رگرسیون از روی ویژگی‌های زودیافت خاک را تخمین زدند. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی با تابع فعال‌سازی سیگموئیدی با تعداد ۶ نورون در لایه ورودی، ۱۰ نورون در لایه مخفی و ۳ نورون در لایه خروجی با شاخص‌های عملکرد R² و RMSE از ۰/۶۱۹ تا ۰/۸۹۰ و ۱/۶۸۴ تا ۲/۰۲۲ در مقایسه با سایر توابع فعال‌سازی (روش شبکه

1. Soil water retention curve

۲. Multi Layer perceptron

عصبی) و روش رگرسیونی به عنوان شبکه بهینه دارای بهترین عملکرد در برآورد خروجی های مورد نظر است (بلیانی و همکاران، ۱۳۹۱).

رضانی و همکاران، از یک روش بهینه سازی باهدف حداقل سازی مربعات خطا، به منظور تخمین پارامترهای معادله ون گنوختن (m و α) از دونقطه اندازه گیری شده منحنی نگهداشت رطوبتی خاک استفاده کردند. ایشان از مدل رزتا به منظور تخمین پارامترهای مدل ون گنوختن با استفاده از شش پارامتر ورودی شامل بافت خاک، جرم مخصوص ظاهری و مقدار رطوبت اندازه گیری شده در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم استفاده کردند. مقدار شاخص های آماری، میانگین باقی مانده (MR)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب آکایک (AIC) در تحقیق ایشان برای روش بهینه سازی به ترتیب برابر با -0.084 ، -0.031 و -8636 ($cm^3 \cdot cm^{-3}$) و برای مدل رزتا به ترتیب -0.037 ، -0.051 و 0 و -7327 ($cm^3 \cdot cm^{-3}$) به دست آمده است. ایشان از این مقایسه نتیجه گرفتند که روش بهینه سازی با دقت مناسبی منحنی نگهداشت رطوبتی خاک را پیش بینی می کند (رضانی و همکاران، ۱۳۹۲).

فاضلی سنگانی و پیلهور شهری، برای تخمین منحنی نگهداشت رطوبتی خاک از مدل های فرکتالی استفاده کردند. به این منظور بعد فرکتالی توزیع اندازه ذرات و منحنی نگهداشت رطوبتی خاک با استفاده از مدل های فرکتالی تعیین و رابطه بین بعد فرکتالی منحنی نگهداشت رطوبتی خاک (D_{swrc}) با بعد فرکتالی توزیع اندازه ذرات خاک (D_{psd})، بافت خاک، میانگین هندسی ذرات خاک (d_g) و چگالی ظاهری (ρ_b) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن ها نشان داد که رابطه ی معنی داری (در سطح ۱ درصد) بین D_{swrc} و D_{psd} و d_g با ضریب تبیین ($R^2=0.95$) برقرار است (فاضلی سنگانی و پیلهور شهری، ۱۳۹۲).

امیر عابدی و همکاران، روش های رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی را به منظور برآورد رطوبت ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم و آب قابل دسترس را با استفاده از ویژگی های زود یافت خاک مورد مقایسه قرار دادند. مقایسه نتایج نشان داد که مقادیر R^2 و RMSE برای رطوبت نقطه پژمردگی دائم و رطوبت

ظرفیت زراعی و آب قابل دسترس ۰/۸۹ و ۲/۲۹، ۰/۸۲ و ۱/۳۸، ۰/۵۷ و ۱/۹۷ برای بهترین مدل رگرسیونی و به ترتیب برابر ۰/۸۷، ۱/۹، ۰/۹ و ۱/۰۲، ۰/۷۳ و ۱/۵۶ برای بهترین مدل شبکه عصبی مصنوعی بود. با توجه به معیارهای به دست آمده روش شبکه عصبی برای برآورد رطوبت نقطه پژمردگی، رطوبت ظرفیت زراعی و آب قابل استفاده از روش رگرسیونی مناسب تر است (امیر عابدی و همکاران، ۱۳۹۲).

ذوالفقاری و همکاران، با استفاده از آنالیز رگرسیونی کارایی روش تک پارامتری چین و همکاران (۲۰۱۰) را برای تخمین پارامترهای منحنی نگهداشت رطوبتی خاک فرلاند و ژیانگ در خاک ایران و بانک داده‌ای UNSODA مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج نشان داد که روش تک پارامتری مذکور نسبت به برخی از توابع انتقالی ارائه شده در کشور با مقادیر $R^2=0/96$ و $RMSE=0/026$ دارای کارایی بالاتری در برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک است (ذوالفقاری و همکاران، ۱۳۹۲).

باباییان و همکاران، کارایی توابع انتقالی (PTF_s) و توابع انتقالی طیفی (STF_s) را در برآورد پارامترهای مدل منحنی نگهداشت رطوبتی خاک ون گنوختن و بروکس و کوری بررسی کردند. نتایج نشان داد که PTF_s و STF_s خاک‌های منطقه در هر دو رویکرد نقطه‌ای و پارامتریک نسبت به PTF_s های دیگر مناطق جهان با متوسط RMSR برابر ۰/۱، برای پیش‌بینی منحنی نگهداشت رطوبتی خاک دقت بیشتری با متوسط RMSR برابر ۰/۰۲۹ دارند. دقت برآورد رطوبت خاک توسط مدل ون گنوختن با متوسط RMSR برابر 0/034 نسبت به مدل بروکس و کوری با متوسط RMSR برابر 0/041 بیشتر بود (باباییان و همکاران، ۱۳۹۳).

طلوعی و همکاران، از توابع انتقالی برای تعیین شاخه خشک شدن منحنی نگهداشت رطوبتی خاک بروکس و کوری استفاده کردند. برای این منظور داده‌های تجربی شاخه‌های خیس و خشک شدن را به ترتیب با استفاده از روش مزرعه‌ای شانی (۱۹۸۷) و دستگاه صفحات فشاری در ۲۴ خاک مختلف اندازه گرفتند که شاخص ضریب تعیین (R^2) آن در حدود ۰/۸ تا ۰/۹ متغیر بوده است. رابطه رگرسیونی

غیرخطی چند متغیره بین هر کدام از پارامترهای مدل بروکس و کوری با استفاده از ویژگی‌های زود یافت خاک برقرار و توابع مختلف جهت برآورد برای هر دو شاخه خشک و خیس شدن ارائه شد. برای ارزیابی توابع از مقدار آماری جذر میانگین مربعات خطای نسبی، میانگین هندسی نسبت خطا و انحراف استاندارد هندسی نسبت خطا استفاده کردند. نتایج نشان داد که پارامترهای بروکس و کوری نسبت به متغیر رس، پارامترهای مدل بروکس و کوری نسبت به جرم مخصوص ظاهری و پارامترهای بروکس کوری نسبت به ماده آلی حساسیت بیشتری دارد. تحلیل حساسیت نشان داد که متغیرهای ماده آلی، جرم مخصوص ظاهری و متغیر رس به‌عنوان ویژگی‌های غالب در شکل‌گیری شاخه خشک و خیس شدن منحنی نگهداشت رطوبتی خاک و رفتار پسماند نقش اساسی دارد (طلوعی و همکاران، ۱۳۹۴).

فولادی دوره‌انی، از منحنی رطوبتی خاک در طراحی سیستم‌های آبیاری و زهکشی و مسائل مربوط به حرکت آب در خاک استفاده کردند. به این منظور در ۲۰ نقطه در ۵ کلاس بافتی، مقدار سطح ویژه و مقدار آب خاک در مکش‌های مختلف اندازه‌گیری شده و نتیجه گرفتند که بین مقدار سطح ویژه و پارامترهای منحنی نگهداشت رطوبتی خاک با معادله ون‌گنوختن با $R^2 = 0/88$ ارتباط خوبی وجود دارد (فولادی دوره‌انی، ۱۳۹۵).

اصغرزاده دانش، برای تخمین منحنی نگهداشت رطوبتی خاک دشت قروه و دهگلان با استفاده از روش معکوس نشان دادند که معادله بروکس و کوری برای تخمین رطوبت خاک‌های لوم‌رسی سیلتی با مقدار خطا RMSE برابر با ۰/۰۱۶، خاک رس سیلتی با مقدار خطا RMSE برابر ۰/۰۲۷ و معادله فردلاند ژینگ برای خاک‌های لوم با خطا RMSE برابر ۰/۰۱۰ و خاک لوم‌رسی با خطا RMSE برابر ۰/۰۴ بهترین عملکرد را داشته‌اند (اصغرزاده دانش، ۱۳۹۴).

اسماعیل نژاد و همکاران، از روشی که توسط لینهارد و همکاران (۱۹۸۹) پیشنهاد شده بود برای تعیین پارامترهای مدل ون‌گنوختن برای ۱۰۰ نمونه خاک از بعد فرکتالی منحنی نگهداشت رطوبتی خاک استفاده کردند. ایشان با مقایسه پارامترهای ون‌گنوختن با مدل رزتا و روش فرکتالی نتیجه گرفتند که

مدل رزتا برآورد بهتری از پارامترهای مدل ون گنوختن نسبت به روش فرکتالی دارد اما روش فرکتالی برآورد مناسبتری نسبت به مدل رزتا در پیش‌بینی منحنی نگهداشت رطوبتی خاک دارد. همچنین روش فرکتالی امکان ایجاد روابط فیزیکی جهت تخمین مقدار پارامترهای مدل ون گنوختن با استفاده از بعد فرکتال و نقطه ورود هوا به خاک را فراهم می‌کند (اسماعیل‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۵).

استواری و همکاران، از توابع انتقالی استواری-بیگی (۱۳۹۲) و قنبریان - میلان (۲۰۱۰) که هر دو از یک بانک اطلاعاتی (UNSODA) استخراج‌شده بود جهت برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک استفاده کردند. نتایج نشان که توابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) در مکش‌های کم، کارایی خوب و مشابه با توابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) دارد. در مکش‌های زیاد و نزدیک به نقطه پژمردگی دائم، توابع استواری-بیگی (۱۳۹۲) که از بعد فرکتال اجزای بافت خاک به‌عنوان متغیر مستقل ورودی استفاده می‌کنند، کارایی بیشتری نسبت به توابع قنبریان-میلان (۲۰۱۰) دارند. مقدار خطا RMSE در تمام مکش‌ها برای هر دو توابع تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای نداشت و تنها در رطوبت ظرفیت مزرعه (Fc) تابع استواری-بیگی مقدار این خطا برابر ۰/۰۱ و برای تابع قنبریان (۲۰۱۰) مقدار RMSE برابر ۰/۰۷ بود که بیانگر کارایی بیشتر تابع استواری - بیگی (۱۳۹۲) در برآورد ظرفیت مزرعه است (استواری و همکاران، ۱۳۹۶).

راولز و براکنسیک، برای توسعه‌ی توابع نقطه‌ای، داده‌هایی را از ۲۵۴۳ افق در سراسر کشور آمریکا جمع‌آوری کردند و به‌منظور افزایش دقت معادلات رگرسیونی از میزان رطوبت در پتانسیل‌های ماتریک ۳۳- و ۱۵۰۰- کیلوپاسکال استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد دقت معادلات رگرسیونی که برای پیش‌بینی منحنی نگهداشت رطوبتی خاک به کار می‌روند، با استفاده از رطوبت در مکش ۳۳- و همچنین رطوبت در مکش ۱۵۰۰- کیلوپاسکال در ترکیب با سایر خصوصیات خاک فیزیکی خاک افزایش می‌یابد (راولز و براکنسیک، ۱۹۸۲).

وریکن و همکاران، با استفاده از نمونه‌های دست‌نخورده، پارامترهای معادله ون‌گنوختن (۱۹۸۰) را با استفاده از متغیرهای مستقل شن، رس، کربن آلی و جرم مخصوص ظاهری برآورد کردند. نتایج ایشان نشان داد که اگر فراوانی نسبی ذرات به نه بخش (جزء) تقسیم شود در مقایسه با جدا کردن ذرات خاک به سه جزء شن، سیلت و رس توابع ایجادشده عملکرد بهتری خواهند داشت (وریکن و همکاران، ۱۹۸۹).
پاچپسکی و همکاران، با استفاده از شبکه‌های عصبی مقادیر ضرایب مدل ون‌گنوختن را محاسبه کردند. شبکه‌ای که برای این منظور استفاده شد، شامل سه نورون خروجی و هفت نورون ورودی، برابر با تعداد داده‌های ورودی است. برای این منظور داده‌های مربوط به بافت خاک و جرم مخصوص ظاهری مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده، همبستگی خوبی بین ضرایب به‌دست‌آمده از روش شبکه عصبی و مقادیر محاسبه‌شده با روش رگرسیونی را نشان نداد. نتایج ایشان نشان داد که احتمالاً پارامترهای معادله ون‌گنوختن از خصوصیات دیگر خاک نیز تأثیر می‌پذیرد (پاچپسکی و همکاران، ۱۹۹۶).

اسچاپ و همکاران، با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی موفق به برآورد پارامترهای مدل‌های ون-گنوختن (۱۹۸۰) و گاردنر (۱۹۵۸) گردیدند. ایشان در ابتدا با استفاده از ورودی‌های فراوانی نسبی ذرات، شبکه‌های موردنظر را طراحی کردند. سپس به‌صورت سلسله‌وار ورودی‌های جدید را به شبکه اضافه نمودند و در هر مرحله عملکرد شبکه‌های طراحی‌شده را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد با ورود متغیرهای جدید به شبکه به‌عنوان برآورد کننده، عملکرد شبکه در برآورد پارامترهای یادشده بهبود یافت. با این‌وجود تفاوت قابل‌ملاحظه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده مشاهده نمودند (اسچاپ و همکاران، ۱۹۹۸).

پاچپسکی و راولز، برای تخمین مقادیر رطوبت خاک در شرایط ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم، توابع انتقالی بر مبنای درصد شن، رس، ماده آلی، اجزای درشت خاک، چگالی ظاهری و گنجایش تبادل کاتیونی بسط و توسعه دادند. نتایج ایشان نشان داد که در رژیم رطوبتی گرم و خشک مقادیر شن، رس

و CEC برای تخمین درصد حجمی رطوبت در شرایط ظرفیت زراعی در معادلات ارائه شده، تأثیر معنی دار داشتند (پاچپسکی و راولز، ۱۹۹۹).

میناسنی و همکاران، روش های مختلف گسترش توابع انتقالی پارامتریک و نقطه ای را که شامل رگرسیون خطی چندگانه، رگرسیون غیرخطی و شبکه عصبی مصنوعی می باشند را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که بهترین روش جهت گسترش توابع انتقالی پارامتریک استفاده از رگرسیون غیرخطی بوده است و اعتبار سنجی توابع به دست آمده از شبکه عصبی مصنوعی بهتر بوده است. در تحقیق ایشان مشخص شد که برای گسترش توابع انتقالی نقطه ای استفاده از رگرسیون خطی چندگانه مناسب تر از روش رگرسیون غیرخطی و شبکه عصبی مصنوعی است (میناسنی و همکاران، ۱۹۹۹).

مایر و جارویس، توابع انتقالی را برای برآورد پارامترهای منحنی نگهداشت رطوبتی خاک هاتسون کاس (شکل اصلاح شده کمپل) ارائه دادند، ایشان از بافت خاک، جرم مخصوص ظاهری و محتوای کربن آلی استفاده کردند و معادلات رگرسیونی چندگانه با استفاده از سری داده های خصوصیات فیزیکی خاک های انگلیس و ولز به دست آوردند. نتایج ایشان نشان داد برای این مجموعه داده ها مقدار خطا RMSE، $0/043 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ به دست آمد (مایر و جارویس، ۱۹۹۹).

توماسلا و همکاران، در برآورد پارامترهای مدل رطوبتی ون گنوختن (۱۹۸۰) در تعدادی از خاک های مناطق حاره کشور برزیل، توابع انتقالی جدید ارائه نمودند. برآورد پارامترهای مدل ون گنوختن با استفاده از داده های پایه و از روش رگرسیون چندگانه و بهینه سازی این پارامترها با استفاده از مقادیر برآورد شده نسبت به مقادیر اندازه گیری شده انجام گرفت. نتایج ایشان نشان داد توابع انتقالی جدید دارای ریشه میانگین مربعات خطا RMSE بین $3/78$ تا $5/84$ سانتی متر مکعب بود. در صورتی که وقتی توابع ارائه شده برای مناطق معتدله استفاده شد ریشه میانگین مربعات خطا از $0/08$ تا $10/44$ سانتی متر مکعب متغیر بود. با افزایش مقدار سیلت RMSE تابع جدید افزایش یافت اما در توابع مناطق معتدله با افزایش مقدار سیلت RMSE کاهش یافته است (توماسلا و همکاران، ۲۰۰۰).

راجکایی و همکاران، از مدل چهار پارامتری ون گنوختن برای پیش‌بینی منحنی نگهداشت رطوبتی در ۳۰۵ نمونه خاک از خاک‌های کشور مجارستان استفاده کردند، ایشان کاربرد یک نقطه نگهداشت رطوبتی به‌عنوان متغیر ورودی در توابع خود را مؤثر دانسته و به افزایش ۲۵ درصدی کارایی توابع خود اشاره نمودند (راجکایی و همکاران، ۲۰۰۴).

مردون و همکاران، با استفاده از توابع انتقالی و شبکه عصبی مصنوعی پارامترهای مدل ون گنوختن و هدایت آبی اشباع را برآورد نمودند. در این پژوهش ۱۳۰ نمونه داده‌ها برای پی‌ریزی مدل‌ها و ۶۵ نمونه باقی‌مانده برای ارزیابی مدل‌ها مورداستفاده قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد مدل‌های رگرسیونی برآورد بهتری از پارامترهای مدل ون گنوختن و مقدار رطوبت در نقاط خاص از منحنی نگهداشت رطوبتی خاک، نسبت به شبکه عصبی مصنوعی داشته‌اند. با وجود این، تفاوت یادشده در برآورد متغیرهای موردنظر، از نظر آماری معنی‌دار نبوده است (مردون و همکاران، ۲۰۰۶).

مانیام و همکاران، عملکرد دو مدل منحنی نگهداشت رطوبتی خاک ون گنوختن (۱۹۸۰) و کمپل (۱۹۷۴) را در خاک‌های شنی نیجریه باهم مقایسه کردند و دریافتند که دقت مدل کمپل از مدل ون گنوختن برای نمونه خاک‌های با درصد شن بالاتر بیشتر بود. همچنین برآورد مدل ون گنوختن در ناحیه خشک منحنی نگهداشت رطوبتی خاک (مکش بالا) بیشتر از مقدار واقعی بود و در ناحیه مرطوب (مکش کم) عملکرد خوبی نشان داد. نتایج این تحقیق نشان داد که همیشه مدل دارای پارامترهای بیشتر، لزوماً دارای کارایی بیشتر نیست (مانیام و همکاران، ۲۰۰۷).

عباسی و همکاران، در تحقیق خود عملکرد ۱۳ تابع انتقالی در پیش‌بینی منحنی نگهداشت رطوبتی برای خاک‌های شور و شور سدیمی را باهم مقایسه کردند. نتایج نشان داد مدل ساکستون و همکاران (۱۹۸۶) و مدل کمپل (۱۹۷۴) به ترتیب منحنی نگهداشت رطوبتی خاک را بهتر از سایر مدل‌ها پیش‌بینی می‌نمایند (عباسی و همکاران، ۲۰۰۹).

قربانی دشتکی و همکاران، با استفاده از روش رگرسیونی گام‌به‌گام، توابع نقطه‌ای و پارامتریکی را برای تخمین منحنی نگهداشت رطوبتی خاک ارائه دادند. متغیرهای مستقل استفاده‌شده در این پژوهش فراوانی نسبی ذرات و جرم ویژه ظاهری خاک در یک گروه و متغیرهای میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات و جرم ویژه ظاهری خاک در گروه دیگر بود. توابع پی‌ریزی شده در این پژوهش با شبکه عصبی ROSETTA مقایسه شد. نتایج نشان داد عملکرد توابع نقطه‌ای ایجادشده در برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک بهتر از توابع پارامتریک بود. همچنین عملکرد توابع انتقالی پی‌ریزی شده در این پژوهش در برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک مناسب‌تر از شبکه عصبی ROSETTA عمل کرد (قربانی دشتکی و همکاران، ۲۰۱۰).

شیرانی و رفیع نژاد، یک مدل رگرسیونی با روش گام‌به‌گام را برای تخمین رطوبت ظرفیت زراعی ایجاد کردند و مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار را پارامترهای رس، شن و گچ دانستند. همچنین آن‌ها بیان داشتند که مقدار رس بیشترین تأثیر را در برآورد رطوبت ظرفیت زراعی داشت (شیرانی و رفیع نژاد، 2012).

قنبریان و همکاران، دو روش پیشنهادشده توسط ون‌گنوختن (۱۹۸۰) و لنهارد و همکاران (۱۹۸۹) را برای تخمین منحنی نگهداشت رطوبتی خاک مقایسه کردند. در این دو روش، ارتباط بین مدل‌های بروکس و کوری و ون‌گنوختن و ارتباط بین پارامترهای هیدرولیکی مدل بروکس و کوری و هندسه‌ی جامد حفره، برای تخمین پارامترهای مدل ون‌گنوختن به‌کاربرده شد. از دو مجموعه داده برای ارزیابی و اعتبارسنجی روش‌های پیشنهادشده استفاده شد. بر اساس روش‌های مذکور، یک رابطه‌ی فیزیکی برای پیش‌بینی پارامترهای مدل ون‌گنوختن از بعد هندسی جامد-حفره و مقدار مکش مربوط به ورود هوا به دست آورده شد. برای ارزیابی روش‌های مذکور از پارامترهای آماری جذر میانگین مربعات خطا و شاخص آکایک، استفاده گردید. نتایج نشان داد که روش لنهارد و همکاران تخمین مناسب‌تری از پارامتر m را فراهم می‌کند و عملکرد بهتری نسبت به نرم‌افزار ROSETTA دارد. در نتیجه‌ی تحقیق عنوان‌شده است

که هیچ کدام از روش‌های مورد استفاده، پیش‌بینی‌های مناسبی برای پارامتر α مدل ون گنوختن، به همراه نداشته است (قنبریان و همکاران، ۲۰۱۰).

مصدقی و محبوبی، در پژوهشی توابع انتقالی رگرسیونی برای برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک ایجاد کردند. نتایج ایشان نشان داد مقدار رس، تأثیر معنی‌دار و مثبتی بر رطوبت نگهداری شده توسط خاک از جمله رطوبت ظرفیت زراعی دارد (مصدقی و محبوبی، ۲۰۱۱).

عباسی و همکاران، توابع انتقالی مختلف را در ۶۸ نمونه خاک شور و شور سدیمی جنوب تهران مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد تمامی توابع به‌طور قابل توجهی رطوبت خاک را بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند. همچنین توابع انتقالی نقطه‌ای ارائه شده توسط قربانی دشتکی و همایی (۲۰۰۴) همبستگی خوبی را بین رطوبت اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده نشان می‌دهند. ایشان رطوبت قابل استفاده را نیز با استفاده توابع انتقالی مختلف تعیین کردند و اظهار داشتند که تابع تبدیلی کمپل (۱۹۸۵) بهترین تابع در تعیین رطوبت قابل استفاده است (عباسی و همکاران، ۲۰۱۱).

پتیل و همکاران، با مطالعه خاک‌های ورتیسول هند نشان دادند که مدل کمپل با خطای RMSE برابر ۰/۰۱۹۹ و خطای مطلق برابر با ۰/۰۱۳۴ برای داده‌های منحنی نگهداشت رطوبتی خاک اندازه‌گیری شده در مقایسه با مدل‌های ون گنوختن و بروکس و کوری برتری داشته است. همچنین نتایج ایشان نشان می‌دهد که مدل ون گنوختن نسبت به مدل بروکس و کوری نیز برتری دارد (پتیل و همکاران، ۲۰۱۲).

بتولا و همکاران، در ارزیابی توانایی تعدادی از توابع انتقالی نقطه‌ای و پارامتریک برای برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک در خاک‌های کشور کنگو به این نتیجه دست یافتند که در پتانسیل ماتریک - ۳۳ کیلوپاسکال، تابع نقطه‌ای اولیویرا و همکاران (۲۰۰۲) و دیکرمن (۱۹۸۸) و در پتانسیل ماتریک - ۱۵۰۰ کیلوپاسکال، تابع آرودا و همکاران (۱۹۸۷) و پیدگون (۱۹۷۲) بهترین نتیجه را به دست می‌دهند. همچنین از میان توابع پارامتریک برآورد شده پارامترهای ون گنوختن (۱۹۸۰) با خطای RMSE

برابر با 0/216، تابع توماسلا و هودنت (۲۰۰۲) با خطای RMSE برابر 0/045 و شاپ و همکاران (۲۰۰۱) با خطای RMSE برابر با 0/0397 دارای کارایی بالاتر می‌باشند (بتولا و همکاران، ۲۰۱۲).

آهنگر و همکاران، نمونه‌هایی از خاک‌های رسی سیلتی، لوم شنی و لومی را برای ارزیابی و صحت سنجی روش رگرسیون چند متغیره تکاملی بکار بردند. داده‌های ورودی مدل شامل تخلخل خاک، رطوبت وزنی، لگاریتم نرمال شده مکش، درصد رس و سیلت بوده و داده‌های خروجی آن رطوبت وزنی در مکش‌های موردنظر بوده است. ایشان با مقایسه نتایج روش رگرسیونی چند متغیره تکاملی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی به این نتیجه رسیدند که روش رگرسیونی پیش‌بینی مناسبی جهت برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی دارد (آهنگر و همکاران، ۲۰۱۲).

ژیانگ شنگ و همکاران، با هدف ایجاد و مقایسه روش‌های رگرسیون خطی چندگانه (MLR)، شبکه عصبی و روش ROSETTA را جهت توسعه توابع انتقالی برای مقدار رطوبت اشباع و ظرفیت زراعی مورد استفاده قرار دادند. برای این منظور تعداد ۴۸۸ نمونه از منطقه تری رایو ایالت گینگای چین برداشته و به‌طور تصادفی ۴۰۰ نمونه را برای ایجاد و ۸۸ نمونه را برای اعتبار سنجی مدل انتخاب کردند. معیارهای اعتبار سنجی، RMSE و ME نشان دادند که روش رزتا نسبت به دو روش دیگر در پیش‌بینی رطوبت ظرفیت زراعی بهتر عمل نمود (ژیانگ شنگ و همکاران، ۲۰۱۳).

مدرودا و لیما، از دو مدل غیرخطی برای برآورد چهار پارامتر معادله ون‌گنوختن جهت برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک استفاده کردند. عملکرد مدل‌های پیشنهادی از طریق شاخص‌های آماری مورد ارزیابی قرار گرفت و کارایی مدل برآورد شده با توابع انتقالی توماسلا (۲۰۰۰) به‌عنوان مرجعی برای خاک‌های برزیل مقایسه شد. دقت برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی به کمک توابع انتقالی توسعه داده‌شده در این تحقیق در حدود ۷۰ درصد برآورد گردید که به‌مراتب بیشتر از دقت برآورد مدل سطح یک تابع توماسلا (۲۰۰۰) برای همین پایگاه داده‌ای خاک است (مدرودا و لیما، ۲۰۱۴).

موهانت و همکاران، از چهار نوع توابع انتقالی برای پیش‌بینی رطوبت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم استفاده کردند. جهت توسعه توابع انتقالی در مجموع ۷۲۱ نمونه خاک از سراسر هند انتخاب شد. نتایج نشان داد که از بین توابع توسعه‌یافته، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) با مقادیر خطای RMSE برابر با ۳/۷۸ برای ظرفیت زراعی و $RMSE=4/37$ برای نقطه پژمردگی دائم عملکرد بهتری نسبت به روش رگرسیون چندگانه در برآورد رطوبت داشت (موهانت و همکاران، ۲۰۱۵).

شیتا و ورجا، با استفاده از ۱۰۰ نمونه خاک جمع‌آوری‌شده از منطقه کارناتکای کشور هندوستان اقدام به برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی در دو کلاس بافتی لوم شنی و شن لومی نمودند. نتایج ایشان نشان داد که خاک‌های لوم شنی و شن لومی دارای R^2 بین ۰/۷۱۳ تا ۰/۸۹۵ و مقدار RMSE برای خاک‌های لوم شنی و شن لومی به ترتیب $m^3 m^{-3}$ ۰/۰۲۹ و ۰/۰۱۳ بوده است (شیتا و ورجا، ۲۰۱۵).

فونگ ناین و همکاران، با توسعه و اعتبار سنجی توابع نقطه‌ای، خصوصیات خاک را با استفاده از روش‌های رگرسیونی مختلف مانند SVR^۱، ANN^۲، KNN^۳ در نمونه‌های خاک گرمسیری به دست آوردند. بررسی دقت توابع نشان داد که تمام روش‌های رگرسیونی دقت قابل‌ملاحظه‌ای در برآورد منحنی نگهداری رطوبت خاک در پتانسیل‌های خاص دارند، اما توابع نقطه‌ای به‌دست‌آمده توسط روش‌های غیر پارامتریک حاصل از شبکه عصبی مصنوعی، SVR با RMSE برابر 0/066 و KNN با خطای RMSE برابر 0/05 بهتر از روش MLR با مقدار خطای RMSE برابر ۰/۰۶۸ بوده است. همچنین نتایج نشان داد که توابع ANN و KNN با مقدار خطای در مدل‌سازی رابطه بین آب‌و‌خاک به‌عنوان یک سیستم پیچیده، زمانی که مقدار داده محدود باشد برآورد دقیق‌تری نسبت به SVR دارند (فونگ ناین و همکاران، ۲۰۱۷).

1. Support vector machines for regression

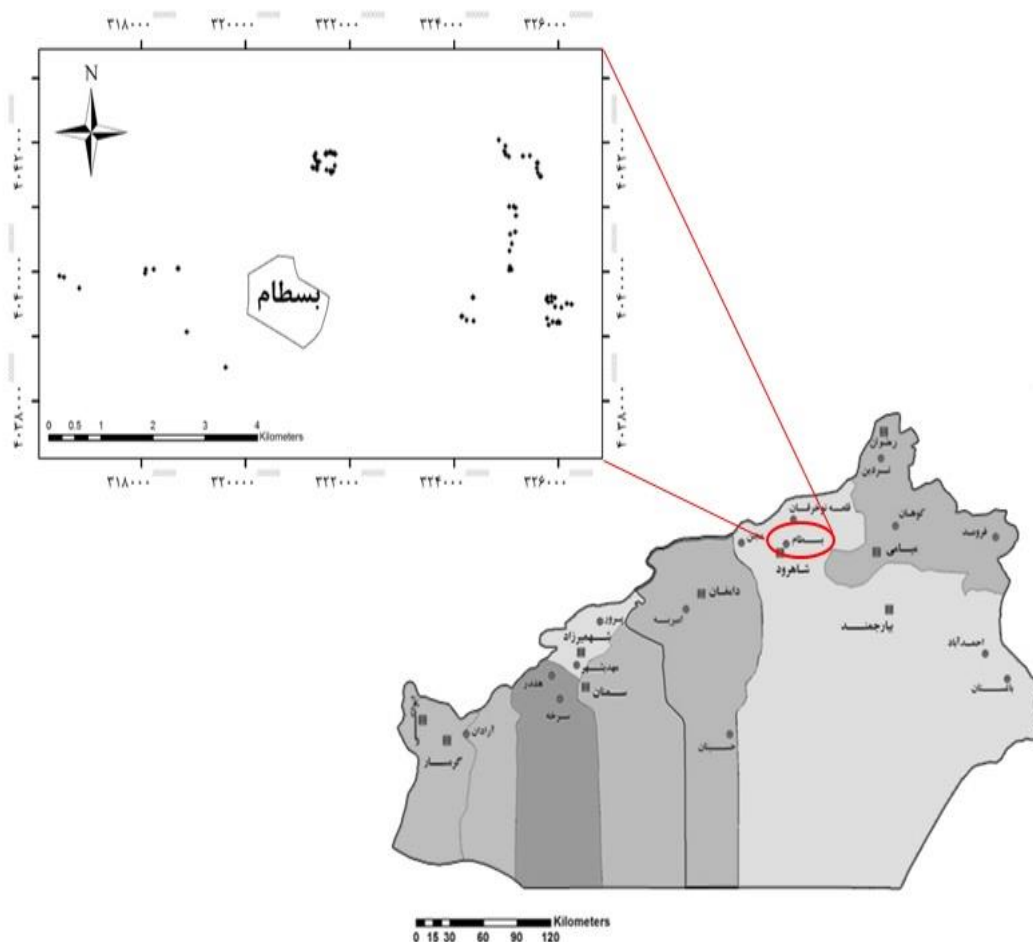
2. Artificial neural networks

3. k-Nearest Neighbours

فصل ۳ : مواد و روش

۱-۳ - موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه مزارع کشاورزی و باغی سه منطقه بسطام-امیریه با طول شرقی $36^{\circ}, 29', 19''$ و عرض شمالی $54^{\circ}, 58', 34''$ ، بسطام-گرچی با طول شرقی $36^{\circ}, 29', 32.1''$ و عرض شمالی $55^{\circ}, 02', 49''$ و دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود با طول شرقی $32^{\circ}, 17', 12''$ و عرض شمالی $41^{\circ}, 64', 5''$ بوده است. این مناطق دارای اقلیم سرد و خشک می‌باشند و نمونه‌برداری از خاک‌های آن در حدفاصل بازه زمانی مهر ۹۶ و آبان ۹۷ انجام گرفته است. نقشه مختصات نمونه‌برداری در شکل ۱-۳ و مکان نمونه‌برداری در جدول ۱-۳ آورده شده است



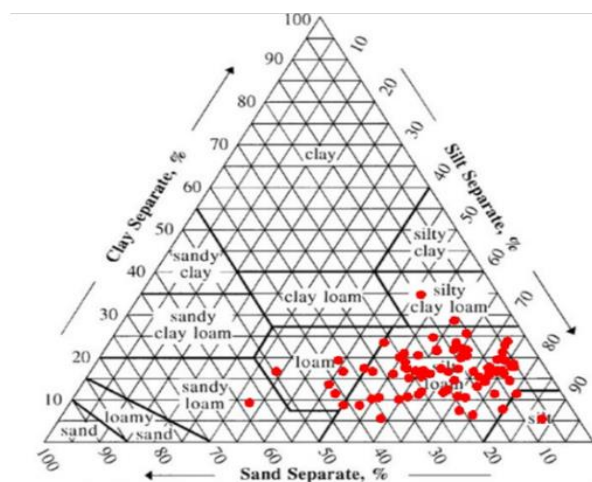
شکل ۱-۳ نقشه مختصات نقاط نمونه‌برداری

جدول ۳-۱ منطقه نمونه برداری شده بافت لوم و سیلت لوم

منطقه خاک	منطقه	نمونه خاک	منطقه	نمونه خاک	منطقه
۶۰	بسطام-گرچی	۳	بسطام-امیریه	۱	بسطام-امیریه
۶۸	دانشکده کشاورزی	۹	بسطام-امیریه	۵	بسطام-امیریه
۷۵	دانشکده کشاورزی	۱۲	بسطام-گرچی	۱۰	بسطام-امیریه
۷۶	دانشکده کشاورزی	۱۶	بسطام-گرچی	۱۴	بسطام-گرچی
۸۰	دانشکده کشاورزی	۲۰	بسطام-گرچی	۱۷	بسطام-گرچی
-	-	۵۸	بسطام-گرچی	۳۷	بسطام-گرچی

۲-۳ - داده‌های مورد نیاز

در این تحقیق به منظور مدل‌سازی منحنی نگهداشت رطوبتی خاک، تعداد ۸۰ نمونه خاک به صورت دست‌خورده و دست‌نخورده جمع‌آوری گردید. پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، نمونه‌های دست‌خورده هوا خشک‌شده و سپس از الک ۲ میلی‌متری جهت تعیین بافت خاک عبور داده شدند. سپس با استفاده از دستگاه صفحات فشاری، رطوبت خاک در مکش‌های صفر، ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال اندازه‌گیری شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد استفاده شده در جدول ۳-۱ و ۳-۲ نشان داده شده است. نمونه‌ها بر اساس طبقه‌های بافتی به پنج طبقه، لوم (۸ نمونه)، سیلت لوم (۶۸ نمونه)، لوم‌شنی (۱ نمونه)، سیلت (۱ نمونه) و لوم‌رسی سیلتی (۲ نمونه) تفکیک شدند که توزیع پراکندگی آن‌ها در مثلث بافت خاک در شکل ۳-۱ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲ توزیع نمونه خاک‌های مورد مطالعه در این تحقیق در مثلث بافت خاک

جدول ۲-۳ توزیع اندازه ذرات و خصوصیات فیزیکی نمونه خاک‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر

فراوانی توزیع اندازه ذرات							
رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	ρ_b (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)	d_g (mm)	σ_g (mm)	
۴/۸	۳۲/۱۵	۴/۸۲	۱/۰۰	۲/۱	۰/۰۱۴	۳/۴۳	کمترین
۳۴/۰۸	۸۷/۵۶	۵۹/۲۱	۱/۹۳	۲/۹۷	۰/۱۷	۱۳/۴۱	بیشترین
۱۵/۹۳	۶۳/۲۲	۲۰/۸۳	۱/۴۹	۲/۴۹	۰/۰۳۸	۷/۸۶	میانگین
۵/۸۹	۱۰/۳۱	۱۱/۱۸	۰/۱۷	۰/۱۲	۰/۰۲۵	۲/۰۴	انحراف معیار
۰/۳۷۰۱	۰/۱۶۲۸	۰/۵۴۰۳	۰/۱۱۹۳	۰/۴۸۹	۰/۶۴۹۹	۰/۲۵۸۹	ضریب - تغییرات

d_g : میانگین هندسی قطر ذرات، σ_g : انحراف معیار هندسی قطر ذرات، ρ_s : جرم مخصوص حقیقی و ρ_b : جرم مخصوص ظاهری

جدول ۳-۳ خصوصیات شیمیایی نمونه خاک‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر

ضریب تغییرات	انحراف معیار	میانگین	بیشترین	کمترین	
۳۹/۱۵	۰/۵۸	۱/۵۰	۳/۱۴	۰/۲۵	ماده آلی (%)
۴۲/۶۲	۱۲۳/۵۶	۲۶/۰۷	۸۲	۲/۵	کربنات کلسیم (%)
۱۳۷/۴۶	۲۹/۲۷	۲۱/۲۹	۲۰۸/۴	۰/۴	کلسیم (meq/L ⁻¹)
۱۱۳/۸۴	۴۰/۸۱	۳۵/۸۵	۱۸۶/۴	۰/۱	منیزیم (meq/L ⁻¹)
۸۷/۹۸	۲۹۲/۵۴	۳۳۲/۴۷	۱۳۴۰	۱۰/۳	سدیم (ppm)
۱۵۴/۱۷	۱۸/۱۱	۱۱/۷۵	۱۱۴/۳	۰/۹	پتاسیم (ppm)
۱۲۵/۳۸	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۹	۰/۰۰	شاخص انبساط آزاد خاک (%)
۴۶/۱۸	$1/28 \times 10^{-6}$	$2/77 \times 10^{-7}$	$5/77 \times 10^{-6}$	$1/25 \times 10^{-7}$	نسبت جذب سدیم (mmlL ⁻¹) ^{0/5}
۱۱۵/۲۶	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۱۰	۰/۰۰	رس قابل پراکنش (%)

۳-۳ - ویژگی‌های زود یافت خاک

ویژگی‌های زود یافت خاک ویژگی‌هایی از خاک هستند که اندازه‌گیری آن‌ها آسان است و نیازی به زمان و هزینه زیادی ندارد. در این پژوهش از ویژگی‌هایی همچون بافت، میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها، جرم مخصوص ظاهری، جرم مخصوص حقیقی، کربنات کلسیم معادل، ماده آلی خاک، میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک به‌عنوان ویژگی‌های زود یافت خاک استفاده شد. روش اندازه‌گیری هریک از این ویژگی‌ها در زیر بیان شده است:

۱-۳-۳ - بافت خاک

جهت اندازه‌گیری بافت خاک از روش پیپت استفاده شد (آندرلین و همکاران، ۲۰۱۳).

۲-۳-۳ - میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات

با استفاده از فراوانی نسبی ذرات خاک، میانگین هندسی قطر ذرات (d_g) و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک (σ_g) به کمک روابط زیر محاسبه شد (شیرازی و بورسما، ۱۹۸۴).

$$d_g = \exp(a) \quad (۲-۳)$$

$$\sigma_g = \exp(b) \quad (۳-۳)$$

$$a = 0.01 \sum_{i=1}^n f_i \ln m_i \quad (۴-۳)$$

$$b^2 = 0.01 \sum_{i=1}^n f_i \ln^2 m_i - a^2 \quad (۵-۳)$$

f_i : درصد فراوانی هریک از اجزای بافت خاک، m_i : میانگین عددی هر جزء (این مقدار برای شن برابر

با ۰/۰۲۵ میلی‌متر، برای سیلت برابر با ۰/۰۲۶ میلی‌متر و برای رس برابر با ۰/۰۰۱ میلی‌متر) و n :

تعداد گروه‌های ذرات خاک

۳-۳-۳ - جرم مخصوص ظاهری

جرم مخصوص ظاهری به روش سیلندر (بلیک و هارتج، ۱۹۸۶) اندازه‌گیری شد. در این روش با

استفاده از سیلندری با حجم مشخص، نمونه‌های خاک دست‌نخورده به مدت ۲۴ ساعت درون آون

در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. با مشخص بودن حجم استوانه (V_t) و وزن خاک خشک درون آن (M_s)، جرم ویژه ظاهری خاک محاسبه شد.

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_t} \quad (۶-۳)$$

۴-۳-۳ - جرم مخصوص حقیقی

برای اندازه‌گیری جرم مخصوص حقیقی از روش پیکنومتر استفاده شد (ویسکانسین، ۱۹۸۶).

$$\rho_s = \frac{(W_s - W_p)\rho_w}{(W_s - W_p) - (W_{sw} - W_w)} \quad (۷-۳)$$

ρ_s : جرم مخصوص حقیقی (gr/cm^3)

W_p : جرم پیکنومتر با درپوش (gr)

W_s : جرم پیکنومتر محتوی خاک خشک (gr)

W_{sw} : جرم پیکنومتر حاوی ذرات خاک که با آب مقطر پر شده است (gr)

W_w : جرم پیکنومتر پر شده با آب مقطر (gr)

ρ_w : جرم مخصوص آب در دمای مشاهده شده (gr/cm^3)

۵-۳-۳ - اسیدیته و هدایت الکتریکی

برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی از عصاره اشباع خاک استفاده شد (نلسون و سومر، ۱۹۸۲). ابتدا

سوسپانسیونی به نسبت ۱ به ۲/۵ (خاک به آب) تهیه گردید. سپس اسیدیته و هدایت الکتریکی با

استفاده از دستگاه EC متر و pH متر اندازه‌گیری شد.

۳-۳-۶ - کربنات کلسیم

کربنات کلسیم خاک به روش خنثی کردن کربنات‌های خاک با اسیدکلریدریک و تیتراسیون برگشتی اسید اضافی با سود اندازه‌گیری شد (آلیسون مودی، ۱۹۶۵).

۳-۳-۷ - کربن آلی خاک

برای اندازه‌گیری کربن آلی خاک از روش والکی‌بلاک استفاده شد (نلسون سومرز، ۱۹۸۲). در این روش خاک با اسیدسولفوریک غلیظ و بیکرومات پتاسیم هضم شد و مخلوط کرده و بیکرومات باقی‌مانده با آمونیوم سولفات تیترا شد.

۳-۳-۸ - کلسیم و منیزیم

اندازه‌گیری کاتیون‌های کلسیم و منیزیم محلول در عصاره خاک به روش تیتراسیون انجام شد (کارتین و میلر، ۲۰۰۸).

۳-۳-۹ - سدیم و پتاسیم

اندازه‌گیری سدیم و پتاسیم با استفاده از دستگاه فلیم فتومتری (U.K.Jenway) تعیین گردید (هلمک واسپارک، ۱۹۹۶).

۳-۳-۱۰ - مقدار رس قابل پراکنش

برای اندازه‌گیری مقدار رس قابل پراکنش از روش رنگاسمی و همکاران، ۱۹۸۴ استفاده شد.

۳-۳-۱۱ - شاخص انبساط آزاد خاک

برای اندازه‌گیری شاخص انبساط آزاد ۲۰ گرم خاک از الک ۴۰ مش عبور داده شد. سپس هر ۱۰ گرم از آن در یک استوانه مدرج ۱۰۰ میلی‌لیتری ریخته شد. یکی از استوانه‌ها با آب مقطر و دیگری با

محلول کروزن به حجم ۱۰۰ میلی لیتر رسانده و با استفاده از یک میله شیشه‌ای محتویات داخل استوانه-ها به هم زده شدند. کروزن مایعی غیر قطبی است که برعکس آب باعث انبساط خاک نمی‌شود در صورتی که آب باعث انبساط کامل خاک می‌گردد. پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها به تعادل رسیده و حجم نهایی خاک در هر کدام از استوانه‌ها قرائت شد. شاخص انبساط آزاد خاک با استفاده از فرمول زیر محاسبه گردید (جوانشیر، ۱۳۹۵).

$$FSI(\%) = \frac{V_d - V_k}{V_k} \times 100 \quad (10-3)$$

V_k : حجم خاک داخل استوانه حاوی کروزن

V_d : حجم خاک داخل استوانه حاوی آب مقطر

۳-۳-۱۲ - اندازه‌گیری منحنی نگهداشت رطوبتی خاک

در این پژوهش به منظور تعیین رطوبت نمونه‌های خاک در مکش‌های مختلف از دستگاه صفحات فشاری در مکش‌های صفر، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۱، ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ بار استفاده شد. مدل‌سازی منحنی نگهداشت رطوبتی خاک به کمک مدل‌های درنر، کمپل، بروکس و کوری و ون گنوختن با فرمول‌های ۳-۱۱ تا ۳-۱۴ در بخش ۳-۴ و در نرم افزار RETC انجام شد در ادامه پارامترهای مدل معرفی شده است.

۳-۴ - مدل‌های مورد استفاده

در این قسمت از مدل‌های کمپل، بروکس و کوری، ون گنوختن و مدل درنر برای پیش‌بینی منحنی نگهداشت رطوبتی استفاده گردید. در ادامه معادلات ریاضی مربوط به مدل‌های مذکور تشریح می‌گردد.

۳-۴-۱ - مدل کمپل

مدل کمپل (۱۳۷۴) یک مدل فیزیکی تجربی است که به صورت تابع نمایی به شکل معادله (۱۱-۳) نوشته می شود.

$$\theta_{(h)} = \theta_s \left(\frac{h_{air}}{h} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (11-3)$$

$\theta_{(h)}$: رطوبت خاک در مکش ماتریک h (cm), h_{air} : مکش ماتریک در نقطه ورود هوا به خاک (cm),

θ_s : رطوبت اشباع ($m^3 m^{-3}$) و b : شیب منحنی نگهداشت رطوبتی خاک است که مقدار آن به بافت

خاک بستگی دارد.

۳-۴-۲ - مدل بروکس و کوری

مدل بروکس و کوری (۱۹۶۲) مشابه مدل کمپل (۱۹۷۴) است با این تفاوت که در این مدل رطوبت باقی مانده در خاک (θ_r) نیز در نظر گرفته شده است معادله به شکل رابطه (۱۲-۳) است:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) (\alpha h)^{-\lambda} \quad \alpha h > 1 \quad (12-3)$$

θ_s : رطوبت اشباع ($m^3 m^{-3}$), θ_r : رطوبت باقیمانده ($m^3 m^{-3}$) و λ : شاخص توزیع اندازه خلل و فرج

خاک (L^{-1}) است، پارامترها از طریق نرم افزار RETC برآورد شد.

۳-۴-۳ - مدل ون گنوختن (۱۹۸۰)

از رایج ترین مدل های منحنی نگهداشت رطوبتی خاک که به طور گسترده نیز مورد استفاده قرار می - گیرد، مدل ون گنوختن است. رابطه ریاضی این مدل به شکل معادله (۱۳-۳) زیر بیان شده است.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha h)^n)^m} \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad n > 1 \quad (13-3)$$

θ_s : رطوبت اشباع ($m^3 m^{-3}$), θ_r : رطوبت باقی مانده ($m^3 m^{-3}$), α , m , n پارامترهایی هستند که شکل

منحنی نگهداشت رطوبتی از آن ها متاثر می شود.

۳-۴-۴ - مدل درنر (۱۹۹۴)

مدل درنر یکی از حالت‌های انتخاب در نرم‌افزار RETC است که به صورت رابطه (۳-۱۴) قابل بیان است.

$$\theta = w_1 * (1 + (\alpha_1 h)^n)^{-m} + w_2 * (1 + (\alpha_2 h)^n)^{-m} \quad (۳-۱۴)$$

w_1 و w_2 : فاکتورهای وزنی مربوط به بخش بافتی و ساختمانی منحنی نگهداشت رطوبتی خاک، h :

پتانسیل ماتریک (Kpa)، θ : مقدار رطوبت ($m^3 m^{-3}$) و n ، $m=1-\frac{1}{n}$ و α پارامترهای مدل ون گنوختن است.

۳-۵ - معرفی نرم‌افزار مورد استفاده

۳-۵-۱ - نرم‌افزار RETC

نرم‌افزار RETC^۱ یک برنامه کامپیوتری برای آنالیز یا برآورد خصوصیات هیدرولیکی خاک‌های غیراشباع می‌باشد. این برنامه یک Domain code عمومی است که اولین بار توسط ون گنوختن ارائه شده است. ورودی‌های نرم‌افزار پتانسیل ماتریک و رطوبت حجمی می‌باشد. برنامه RETC ممکن است برای برآزش دادن چند مدل تحلیلی بر داده‌های اندازه‌گیری شده منحنی رطوبتی خاک و با داده‌های هدایت هیدرولیکی به کار رود. در این تحقیق از این نرم‌افزار برای به دست آوردن پارامترهای مدل‌های ون-گنوختن، بروکس و کوری و درنر استفاده شد.

۳-۵-۲ - نرم‌افزار Rosetta

نرم‌افزار Rosetta توسط شارپ و همکاران (۲۰۰۱) گسترش داده شد. این برنامه کامپیوتری به واسطه‌ی شبکه عصبی پارامترهای منحنی رطوبتی خاک و هدایت هیدرولیکی خاک‌های غیراشباع را بر اساس توابع انتقالی خاک پیش‌بینی می‌کند. ورودی‌های نرم‌افزار درصد شن، رس، سیلت، جرم

^۱. RETention Curve

مخصوص ظاهری، مقدار رطوبت در پتانسیل ماتریک ۳۳ و پتانسیل ماتریک ۱۵۰۰ است. در این پژوهش از این نرم‌افزار جهت به دست آوردن پارامترهای مدل ون گنوختن استفاده شد.

۳-۵-۳- شبکه عصبی مصنوعی

روش شبکه عصبی (ANNs) یکی از مهم‌ترین روش‌هایی است که توسط محققین استفاده می‌شود. کار بر روی شبکه عصبی (ANNs) با الهام از عملکرد مغز انسان از آنجا شروع شد که دانشمندان دریافتند مغز بشر به گونه‌ای کاملاً متفاوت از کامپیوترهای دیجیتالی مرسوم محاسبات را انجام می‌دهد (حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰). ANN برای حل مسائلی به کار برده می‌شود که فرمول آن‌ها ناشناخته مانده است و مدل علت و معلولی یا برای آن وجود ندارد یا اگر هم وجود دارد بسیار پیچیده است (هاتسون و کوهن، ۱۹۹۹). ساختار ANN دارای چندلایه می‌باشد که هر لایه از تعداد متفاوتی نرون، سلول عصبی، واحد پردازش، گره یا عنصر تشکیل شده است. هر ANN دارای یک لایه ورودی، یک لایه خروجی، و صفر یا یک یا تعداد بیشتری لایه پنهان در بین لایه‌های ورودی و خروجی است. تعداد سلول‌ها در لایه‌های ورودی و خروجی به ترتیب برابر با تعداد پارامترهای ورودی و خروجی می‌باشند. برای بهینه کردن تعداد لایه‌های پنهان بایستی بر اساس آزمون و خطا پیش رفت (حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰). برای حل هر مسئله ANN سه مرحله الف: آزمون، ب: معتبر سازی و پ: اجرا را طی می‌کند. آموزش فرایندی است که طی آن شبکه می‌آموزد تا الگوی موجود در ورودی‌ها را بشناسد. معتبر سازی توانایی شبکه برای ارائه جواب قابل قبول در قبال ورودی‌هایی است که در مجموعه آموزشی نبوده است و استفاده از ANN برای انجام عملکردی را که به آن منظور طراحی شده است را اجرا گویند (حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰). استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در زمینه‌های گوناگون علوم خاک از جمله در تخمین انتقال املاح در خاک (بازوسکی و کوالکوسکی، ۲۰۰۶)، تبخیر و تعرق پتانسیل (۲۰۰۹)، تخمین میزان خاک هدررفته در اثر فرسایش خاک (مین یانگ و جان، ۲۰۰۸)، مدل کردن هدایت الکتریکی خاک (نامدار خجسته و همکاران، ۲۰۱۰) و تخمین منحنی رطوبتی خاک (مردان و همکاران، ۲۰۰۶)

از روی خصوصیات زودیافت خاک در حال افزایش است، نتایج به دست آمده از این پژوهش‌ها شبکه عصبی مصنوعی را به عنوان یک ابزار قدرتمند در مدل کردن خصوصیات مختلف خاک معرفی کرده و خصوصیات یادشده را به خوبی مدل سازی می کند. در این پژوهش از شبکه عصبی مصنوعی به منظور اشتقاق توابع انتقالی نقطه ای و تعمیم مدل ون گنوختن-RETC استفاده شد.

۳-۶ - شاخص های آماری

در این تحقیق به منظور ارزیابی توابع انتقالی در برآورد رطوبت خاک از شاخص های ME ، $RMSE$ ، $GSDER$ و AIC ، $GMER$ استفاده شد. که از روابط ۳-۱۲ تا ۳-۱۸ قابل محاسبه می باشند.

۳-۶-۱ - شاخص ریشه ی میانگین مربعات خطا (RMSE)

فرمول این شاخص به صورت زیر بیان شده است:

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{N}\right) * \sum (\theta_{pre} - \theta_{mea})^2} \quad (3-15)$$

در این فرمول n تعداد کل نمونه های مورد استفاده، θ_{pre} پیش بینی شده ی رطوبت و θ_{mea} مقادیر اندازه گیری شده ی رطوبت می باشد. هر چه مقادیر به دست آمده برای این شاخص کمتر باشد نشان دهنده ی این است که پیش بینی های انجام گرفته از صحت بالاتری برخوردار بوده اند.

۳-۶-۲ - میانگین خطا (ME)

فرمول این شاخص به صورت زیر بیان شده است :

$$ME = \left(\frac{1}{n} * \sum (\theta_{mea} - \theta_{pre})\right) \quad (3-16)$$

در این فرمول n تعداد کل نمونه های مورد استفاده، θ_{pre} مقادیر پیش بینی شده ی رطوبت و θ_{mea} مقادیر اندازه گیری شده ی رطوبت می باشد. هر چه مقادیر به دست آمده برای این شاخص کوچک تر باشد نشان دهنده ی این است که عملکرد توابع بهتر بوده است.

۳-۶-۳ - نسبت خطای متوسط هندسی (GMER)

فرمول این شاخص به صورت زیر بیان شده است:

$$GMER = \exp[n^{-1} \sum_{i=1}^n \ln(\varepsilon_i)] \quad (17-3)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\theta_{pre}}{\theta_{mea}}$$

در این فرمول n: تعداد کل نمونه‌های مورد استفاده، θ_{pre} : مقادیر پیش‌بینی شده‌ی رطوبت، θ_{mea} : مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی رطوبت و ε_i : نسبت خطا است. اگر مقدار نسبت خطای متوسط هندسی برابر یک باشد، نشان‌دهنده‌ی تطبیق کامل مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده می‌باشد. مقدار نسبت خطای متوسط هندسی بیشتر از یک نشان‌دهنده بیش برآورد و کمتر از یک نشان‌دهنده کم برآورد می‌باشد (گنجی آزادپور و همکاران، ۱۳۹۴).

۳-۶-۴ - نسبت خطای انحراف استاندارد هندسی (GSDER)

فرمول این شاخص به صورت زیر بیان شده است:

$$GSDER = \exp[(((n-1)^{-1} \sum_{i=1}^n [\ln(\varepsilon_i) - \ln(GMER)]^2)^{1.2})] \quad (19-3)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\theta_{pre}}{\theta_{mea}}$$

θ_{pre} : مقادیر شبیه‌سازی شده، θ_{mea} : مقادیر اندازه‌گیری شده، ε_i : نسبت خطا و n: تعداد کل مشاهدات است. هر چه مقدار آن اندک (نزدیک به یک) باشد، مدل از دقت بیشتری برخوردار است.

فصل ۴ : نتایج و بحث

هدف از این تحقیق برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک مزارع کشاورزی و باغی سه منطقه بسطام-امیریه، بسطام-گرچی و دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود است. برای این منظور منحنی نگهداشت رطوبتی خاک به دو روش مستقیم و غیرمستقیم برآورد شد. نمونه‌برداری به دو صورت خاک دست‌خورده جهت برآورد خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و خاک دست‌نخورده جهت اندازه‌گیری مستقیم رطوبت خاک با استفاده از دستگاه صفحات فشاری بود. برای زمین زراعی به وسعت چند هکتار، یک نمونه برای تعیین پارامترهای فیزیکی و هیدرولیکی خاک منطقه کافی نخواهد بود. این پارامترها عمدتاً بستگی به بافت، ساختمان و سایر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک دارند. به‌عنوان مثال درصد ذرات شن و رس خاک بر روی پارامترهای شکل منحنی نگهداشت رطوبتی خاک تأثیرگذارند (میناسنی و براتنی، ۲۰۰۷) حال آن‌که این درصدها در نقاط مختلف مزرعه تغییر می‌کنند (باقارلو و لاوینو، ۲۰۱۲). لذا در این تحقیق برای هر منطقه بیش از یک نمونه و در مجموع از تمام مناطق ۸۰ نمونه خاک به هر دو صورت دست‌خورده و دست‌نخورده برداشت شد. پراکندگی نمونه خاک‌ها در منطقه مورد مطالعه شامل بافت لوم، سیلت‌لوم، لوم‌شنی، سیلت و لوم‌رسی سیلتی بود. به علت کم بودن تعداد نمونه‌ها در کلاس بافتی لوم‌شنی، سیلت و لوم‌رسی سیلتی از آن‌ها صرف‌نظر شد و منحنی نگهداشت رطوبتی خاک به دو روش مستقیم و غیرمستقیم تنها برای خاک‌های موجود در بافت‌های لوم و سیلت لوم مورد بررسی قرار گرفت. برای برآورد غیرمستقیم منحنی رطوبت در این تحقیق از توابع انتقالی استفاده شد. این توابع به دو گروه توابع انتقالی پارامتریک و توابع انتقالی نقطه‌ای تقسیم شدند. نتایج در این فصل در قالب توابع انتقالی پارامتریک و توابع انتقالی نقطه‌ای ارائه شده است.

۲-۴ - توابع انتقالی خاک (PTFs)

توابع انتقالی خاک متغیرهای زودیافت خاک نظیر بافت، جرم مخصوص ظاهری و میزان ماده آلی را به منظور برآورد ویژگی‌های دیریافت خاک نظیر منحنی نگهداشت رطوبتی خاک مورد استفاده قرار می‌دهند (رضوی قلعه جوق، ۱۳۹۳). در این تحقیق از بین توابع انتقالی دو گروه توابع انتقالی پارامتریک و توابع انتقالی نقطه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۲-۴ - توابع انتقالی پارامتریک

توابع انتقالی پارامتریک توابعی هستند که پارامترهای به‌کاررفته در یک مدل چند متغیره را که تعیین‌کننده رابطه رطوبت و مکش ماتریک است، برآورد می‌کنند. در این قسمت از مدل‌های کمپل (۱۹۷۴)، بروکس و کوری (۱۹۶۴)، درنر (۱۹۹۹) و ون‌گنوختن (۱۹۸۰) استفاده شده است. برای این منظور جهت محاسبه‌ی پارامترهای سه مدل کمپل، بروکس و کوری و درنر از نرم‌افزار RETC و جهت محاسبه‌ی پارامترهای مدل ون‌گنوختن از دو نرم‌افزار RETC و Rosetta استفاده شد.

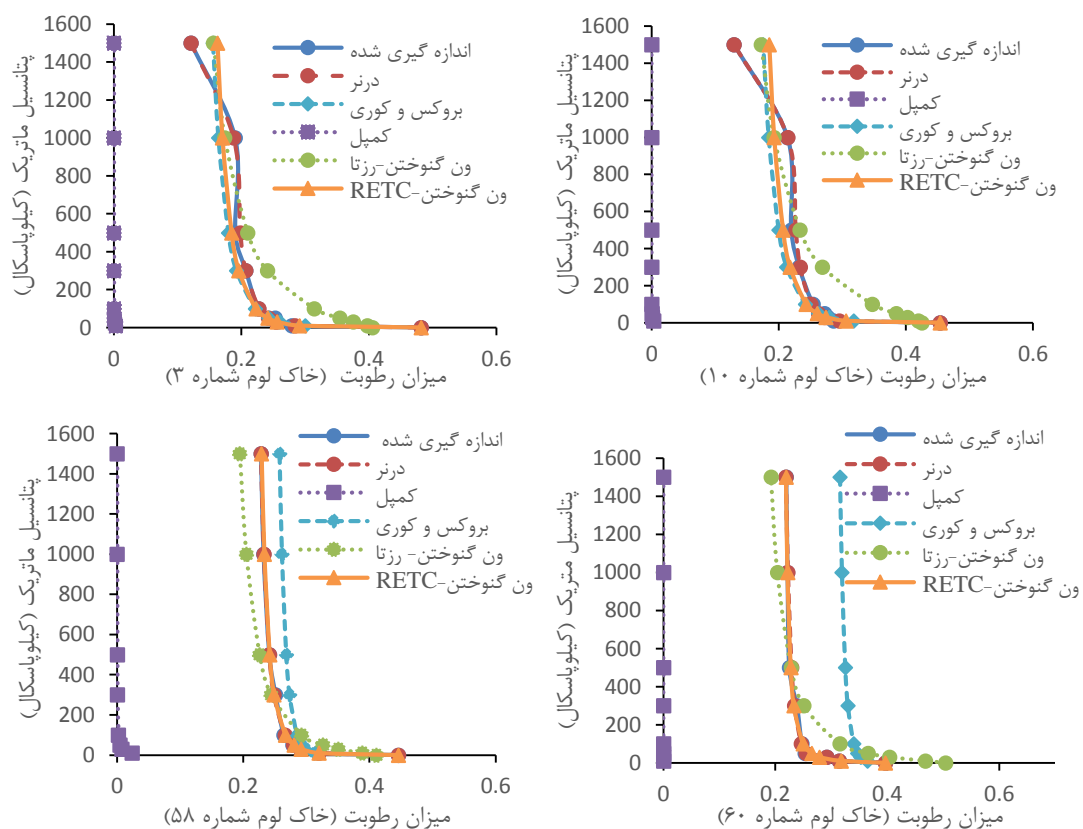
۱-۱-۲-۴ - ارزیابی عملکرد توابع انتقالی پارامتریک در بافت لوم

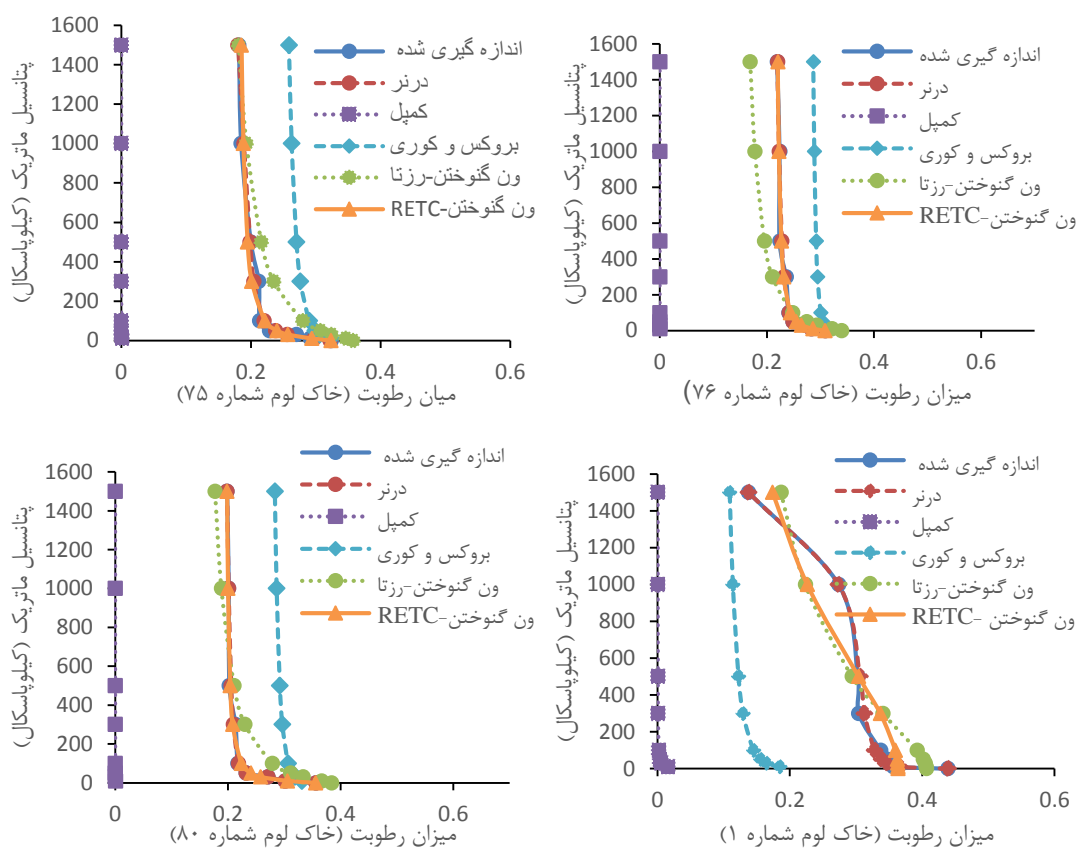
در این بخش به منظور ارزیابی توابع انتقالی پارامتریک در بافت لوم، ابتدا منحنی نگهداشت رطوبتی خاک پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده مورد بررسی قرار گرفته است سپس با استفاده از شاخص‌های آماری به ارزیابی کمی توابع انتقالی پارامتریک به کار رفته در این پژوهش پرداخته شد، در ادامه آب قابل دسترس در بافت لوم محاسبه شد و در نهایت مقدار رطوبت پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در تمامی نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه گردید.

۱-۱-۱-۲-۴ - منحنی نگهداشت رطوبتی خاک در بافت لوم

منحنی نگهداشت رطوبتی خاک اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط مدل‌های درنر، ون‌گنوختن -

Rosetta، ون گنوختن -RETc، کمپل و بروکس و کوری برای هشت نمونه خاک لوم در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴-۱ مقدار رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل‌های ون گنوختن-RETc و درنر نزدیک‌ترین مقدار رطوبت را به رطوبت اندازه‌گیری شده در تمامی پتانسیل‌های ماتریک دارند. لذا این دو مدل بهترین عملکرد را در برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک دارند. مدل ون گنوختن-Rosetta نیز بعد از دو مدل ون گنوختن-RETc و مدل درنر نزدیک‌ترین پیش‌بینی را نسبت به رطوبت اندازه‌گیری شده دارد. به دنبال آن مدل بروکس و کوری شبیه‌سازی نسبتاً مناسبی در تمام دامنه‌های پتانسیل ماتریک نشان داده است. همچنین مدل کمپل به علت پیوسته نبودن برای خاک‌های با بافت لوم شبیه‌سازی بسیار ضعیفی در تمام نقاط پتانسیلی دارد. با توجه به این که خاک‌های مورد بررسی در این پژوهش (خاک‌های ساختمان دار) هستند مدل ون گنوختن-RETc و درنر در تمام طبقه‌های بافتی نتایج برآورد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد. چرا که مدل درنر یک مدل دو تاختلی است و برای خاک‌هایی که دارای منافذ ساختمانی هستند ساخته شده است.





شکل ۱-۴ منحنی نگهداشت رطوبتی خاک اندازه‌گیری شده و برآورد شده برای مجموعه خاک‌های لوم

۴-۲-۱-۱-۲-۴- ارزیابی کمی توابع انتقالی پارامتریک در بافت لوم

تحلیل دقت مدل‌ها در پیش‌بینی منحنی نگهداشت رطوبتی از طریق مقایسه رطوبت حجمی به‌دست‌آمده از مدل‌ها با داده‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از شاخص‌های آماری در جدول ۱-۴ و شکل ۲-۴ انجام شد.

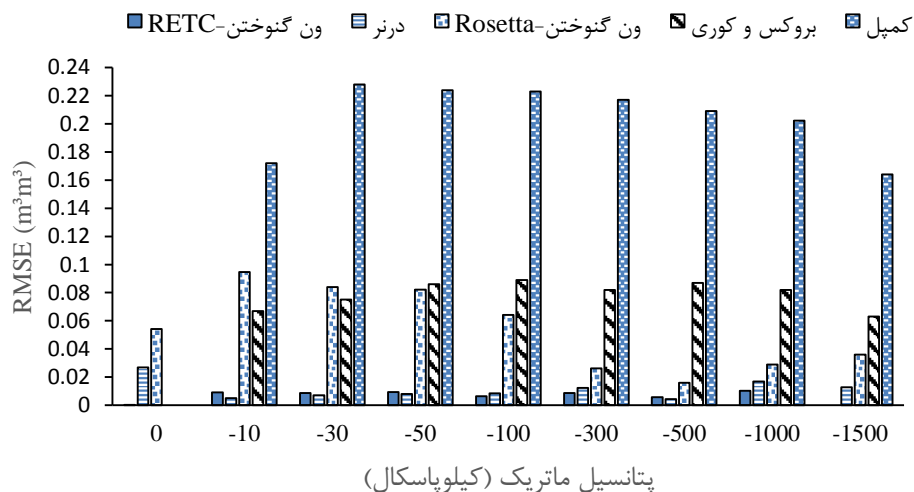
جدول ۱-۴ مقادیر شاخص‌های آماری پنج مدل برآورد رطوبت در کلاس بافت لوم

بافت لوم				مدل
GSDER	GMER	ME	RMSE(m ³ /m ³)	
۱/۰۶۵۴	۱/۰۰۱۶	۰/۰۲۶۸	۰/۰۱۱	درنر
۱/۱۳۰۵	۱/۱۱۸	-۰/۰۳۵۶	۰/۰۵۴	ون گنوختن-Rosetta
۱/۰۲۴	۱/۰۰۳۲۹	-۰/۰۰۰۱۵	۰/۰۰۹۱۶	ون گنوختن-RETC
۴/۴۳	۰/۱۰۶	۰/۱۸۹	۰/۲۰۴	کمپل
۱/۳۸	۱/۰۵۲	-۰/۰۱۶۸	۰/۰۷۸	بروکس-کوری

با توجه به جدول ۴-۱ از بین پنج مدل مورد استفاده، مدل ون گنوختن-RETC بهترین برآورد را در بین چهار شاخص ME، RMSE، GSDER و AIC دارد. چراکه مقدار خطای RMSE و ME در این مدل نسبت به سایر مدل‌ها به صفر نزدیک‌تر، مقدار خطای GSDER به یک نزدیک‌تر است. لذا برای پیش‌بینی منحنی نگهداشت رطوبتی در بافت لوم در منطقه‌ی مورد مطالعه استفاده از مدل ون گنوختن-RETC پیشنهاد می‌گردد. با توجه به شاخص GMER مدل درنر نسبت به سایر مدل‌ها برآورد بهتری داشته است چراکه مقدار خطای GMER به یک نزدیک‌تر است. مدل کمپل در بین این پنج مدل ضعیف‌ترین عملکرد را داشته است. چراکه مقدار خطای RMSE و ME در این مدل نسبت به سایر مدل‌ها از صفر بیشتر، مقدار شاخص GMER از یک کم‌تر، مقدار شاخص GSDER از یک بیش‌تر است. از بین مدل‌های مورد استفاده مدل ون گنوختن-Rosetta، ون گنوختن-RETC و بروکس و کوری با توجه به مقدار خطای ME مقدار رطوبت پیش‌بینی‌شده را بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده برآورد کرده است. براساس نتایج بدست آمده می‌توان گفت که معادله کمپل در خاک‌هایی با بافت ریز و متوسط، تخمین بسیار ضعیفی از مقدار رطوبت خاک دارد. این معادله برای خاک‌هایی که محتوای شن بالاتری هستند عملکرد خوبی دارد (بهمنی و رضانی، ۱۳۹۳).

اصغر زاد دانش (۱۳۹۴) برای تخمین منحنی نگهداشت رطوبتی خاک در بافت لوم از مدل‌های کمپل، بروکس کوری، ون گنوختن و فردلانند و ژیانگ استفاده کرد و بیان داشت که از بین مدل‌های فوق مدل کمپل ضعیف‌ترین عملکرد را دارد که این نتیجه با نتیجه‌ی تحقیق حاضر همخوانی دارد. همچنین فولادمنندو همکاران (۱۳۹۰) جهت برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک در بافت لوم از مدل‌های کمپل، بروکس و کوری و ون گنوختن استفاده کردند. ایشان بیان کردند مدل ون گنوختن عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های بروکس کوری و کمپل در برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی داشته است. نتیجه‌ی ایشان نیز با تحقیق حاضر همخوانی دارد زیرا در تحقیق حاضر هر دو مدل ون گنوختن-RETC و ون گنوختن-Rosetta عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های بروکس کوری و کمپل داشته‌اند.

شکل ۴-۲ وضعیت مدل‌ها در برآورد رطوبت در کلاس بافتی لوم به تفکیک پتانسیل ماتریک نشان داده است. مدل ون گنوختن-RETIC در پتانسیل ماتریک صفر، ۱۰۰-، ۳۰۰- و ۱۰۰۰- کیلوپاسکال بهترین عملکرد را نسبت به سایر مدل‌ها دارد. مدل درنر در پتانسیل ماتریک ۱۰-، ۳۰-، ۵۰-، ۵۰۰- و ۱۵۰۰- کیلوپاسکال بهترین عملکرد را در برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک در بین سایر مدل‌ها دارد. مدل درنر توانسته است مقدار رطوبت را در نقطه ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم بهتر از سایر مدل‌ها پیش‌بینی کند که این نشان‌دهنده برتری مدل درنر در برآورد مقدار رطوبت در دونقطه ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم در خاک لوم نسبت به سایر مدل‌ها است. مدل کمپل، بروکس و کوری و ون گنوختن-Rosetta ضعیف‌ترین عملکرد را دارند. باید توجه داشت در مکش‌هایی که مدل درنر پیش‌بینی بهتری نسبت به سایر مدل‌ها داشته است، پیش‌بینی مدل ون گنوختن-RETIC به مدل درنر بسیار نزدیک بوده لذا همان‌گونه که در قسمت قبل بیان شد از لحاظ میانگین، مدل ون گنوختن-RETIC به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد. مدل کمپل و بروکس و کوری توانایی پیش‌بینی رطوبت را در پتانسیل ماتریک صفر ندارند چراکه در محاسبه‌ی پارامتر λ ، باید مقدار $\ln(0)$ را محاسبه کرد که از نظر ریاضی این مقدار تعریف نشده است.



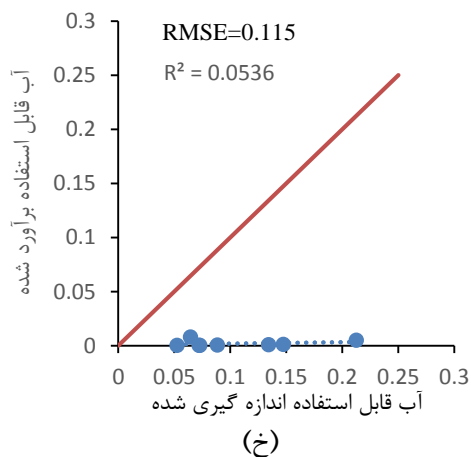
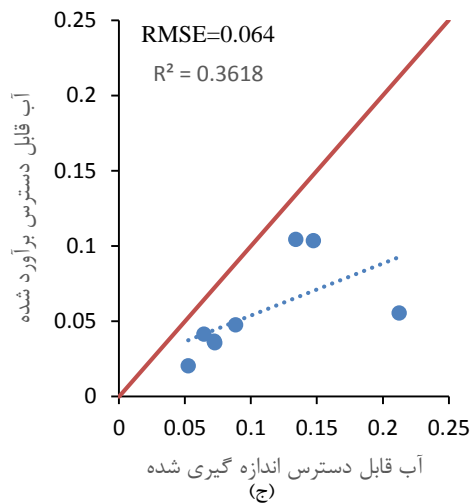
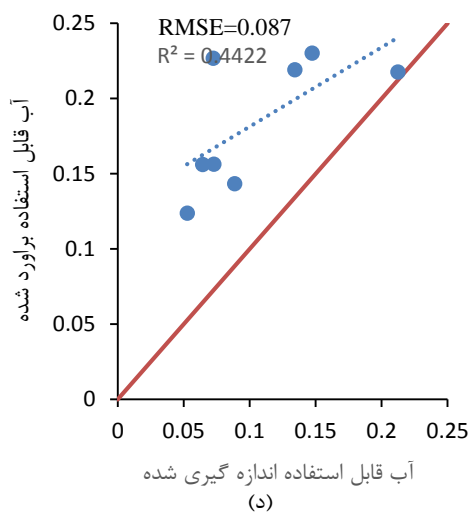
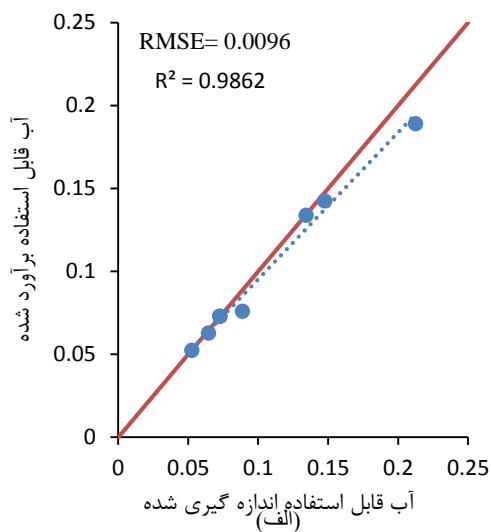
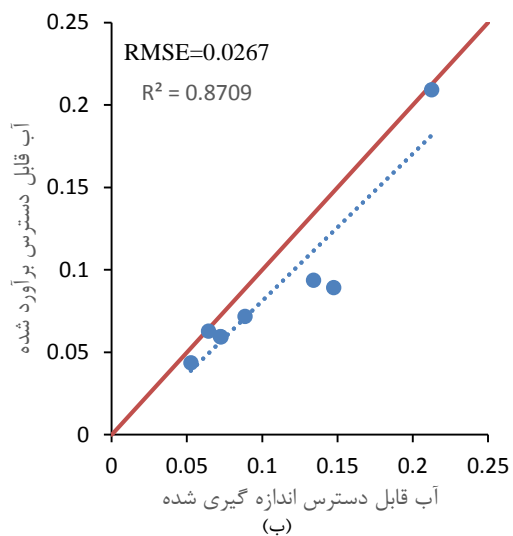
شکل ۴-۲ مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا در برآورد رطوبت برای مدل درنر (۱۹۹۴)، ون گنوختن-RETIC، Rosetta، ون گنوختن-RETIC، کمپل (۱۹۷۴) و بروکس-کوری (۱۹۶۴) در پتانسیل‌های ماتریک متفاوت (خاک لوم)

۴-۲-۱-۱-۳- برآورد آب قابل دسترس در بافت لوم

رطوبت قابل دسترس (RAW) از تفاضل رطوبت درمکش ظرفیت مزرعه (FC) و پژمردگی دائم (PWP) تعیین گردید. همبستگی بین آب قابل دسترس اندازه‌گیری شده و آب قابل دسترس برآورد شده با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد، نتایج حاصل از همبستگی بین آب قابل دسترس اندازه‌گیری شده و آب قابل دسترس برآورد شده نشان داد که بین مقدار آب قابل دسترس اندازه‌گیری شده و آب قابل دسترس برآورد شده در مدل درنر و ون‌گنوختن-RETC ارتباط مستقیم وجود دارد، این ارتباط بیان‌کننده همبستگی مثبت و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد است. در مدل‌های کمپل، بروکس و کوری و ون‌گنوختن-Rosetta هیچ ارتباط معنی‌داری بین مقدار آب قابل استفاده اندازه‌گیری شده و آب قابل استفاده برآورد شده وجود ندارد. عباسی و همکاران (۲۰۱۱) رطوبت قابل دسترس را به‌وسیله توابع انتقالی به‌دست‌آمده توسط قربانی دشتکی و همایی (۲۰۰۴) تخمین زدند. و مقدار RMSE را برابر با ۰/۱۱۷ بین رطوبت قابل دسترس برآورد شده و اندازه‌گیری شده، به دست آوردند. ذوالفقاری و همکاران (۱۳۹۲) بیان کردند که بین مقدار آب قابل دسترس پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده ارتباط مستقیم وجود دارد که بیان‌کننده همبستگی مثبت و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده است. ایشان مقدار RMSE را برابر ۰/۰۳۸ به دست آوردند.

با توجه به شکل ۴-۳-الف داده‌های مدل درنر تقریباً روی خط یک‌به‌یک قرار گرفته است این موضوع نشان‌دهنده‌ی این است که مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده تقریباً برابر است.

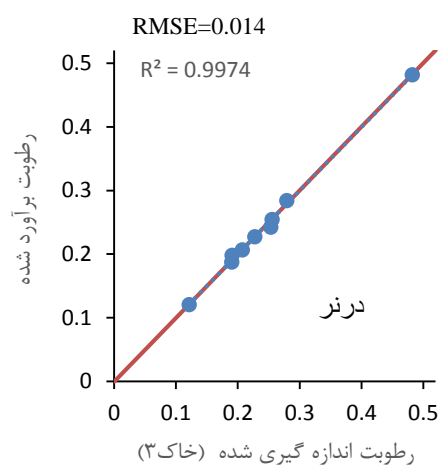
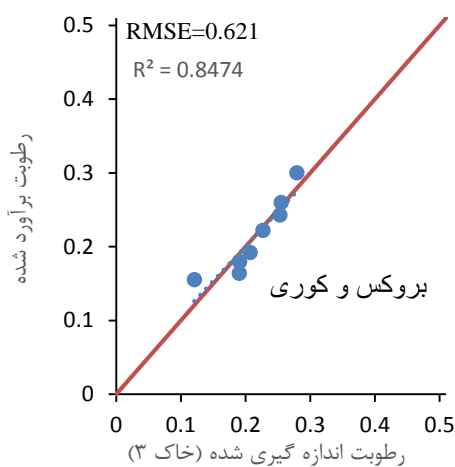
با توجه به شکل ۴-۳-ب، ۴-۳-ج و ۴-۳-خ داده‌های مدل ون‌گنوختن-RETC، بروکس و کوری و کمپل در قسمت پایین خط یک‌به‌یک قرار گرفته است این موضوع نشان‌دهنده‌ی این است که مقدار پیش‌بینی شده کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده است. با توجه به شکل ۴-۳-د داده‌های مدل ون‌گنوختن-Rosetta در بالای خط یک‌به‌یک قرار گرفته است که این موضوع نشان‌دهنده این است که مقادیر پیش‌بینی شده بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری است.

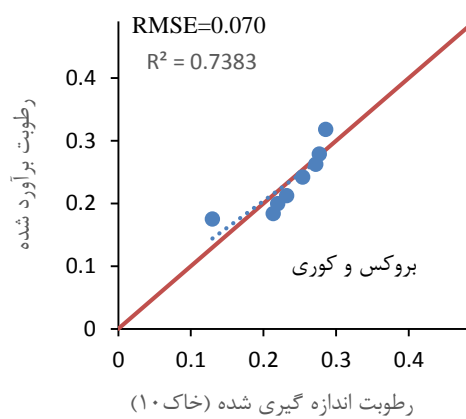
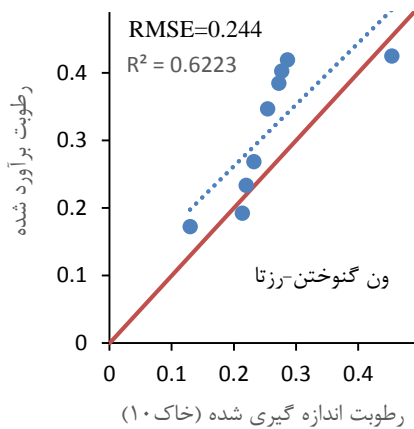
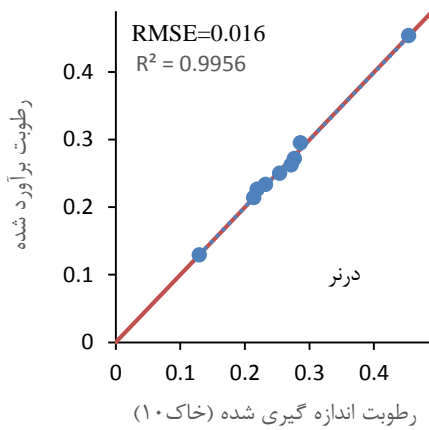
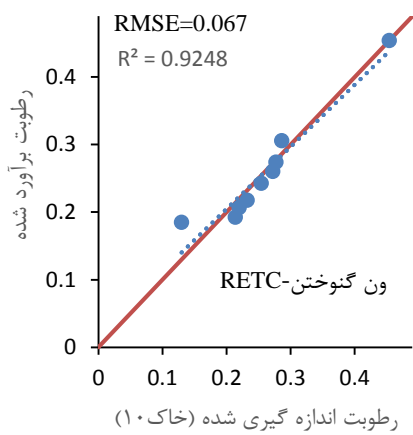
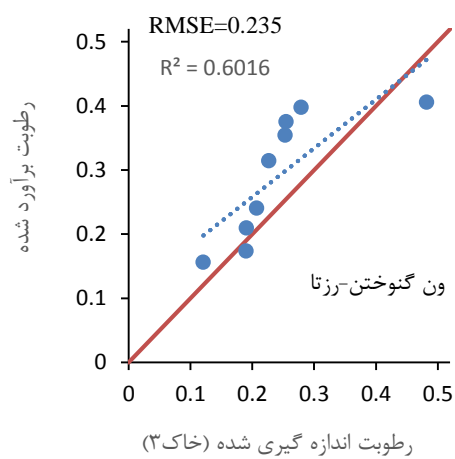
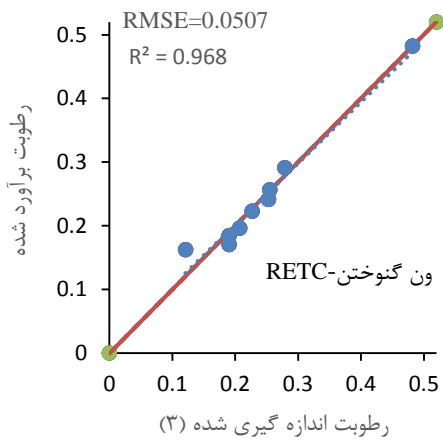


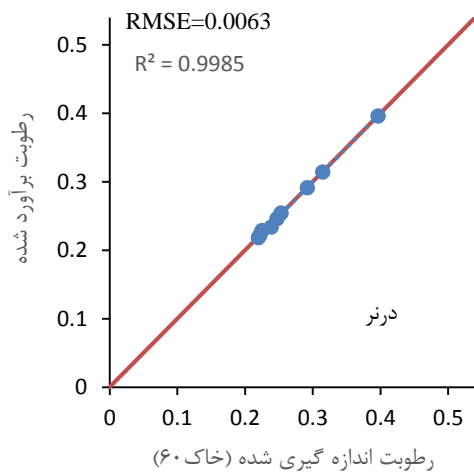
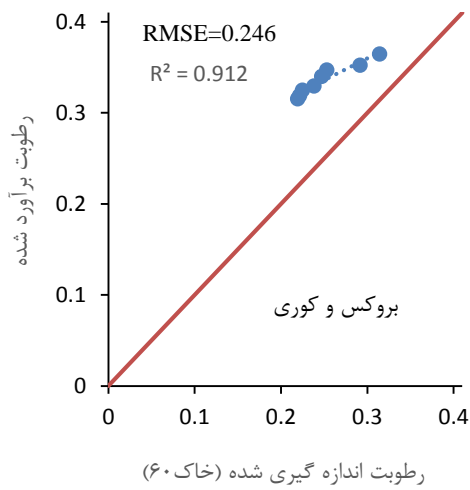
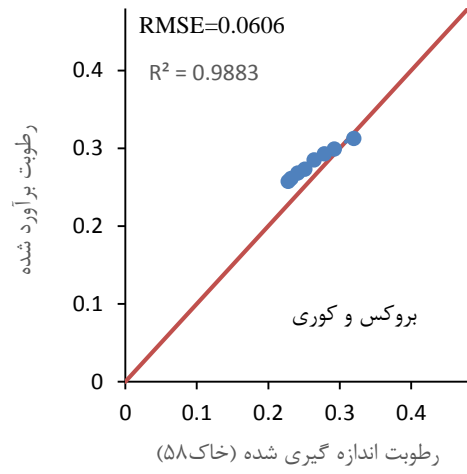
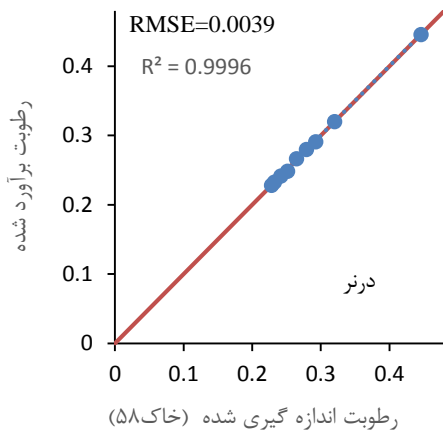
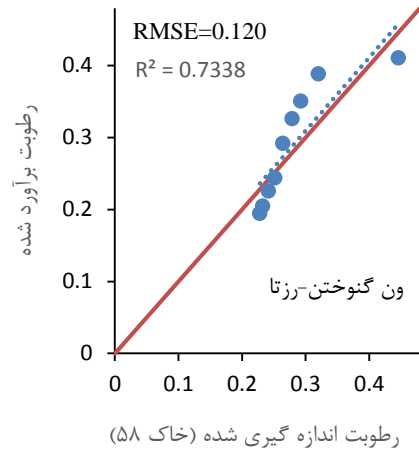
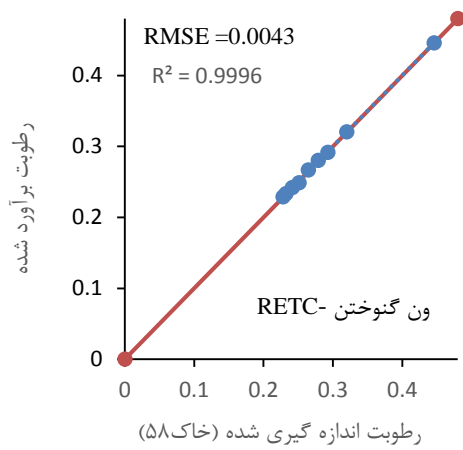
شکل ۳-۴ آب قابل دسترس برآورد شده و اندازه گیری شده نسبت به خط ۱:۱ در خاک لوم
 (الف) مدل درنر و ب- مدل ون گنوختن - RETC ، ج- بروکس-کوری ، د- ون گنوختن-Rosetta ، خ-
 مدل کمپل)

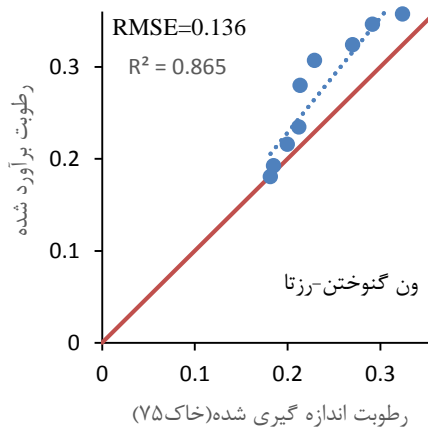
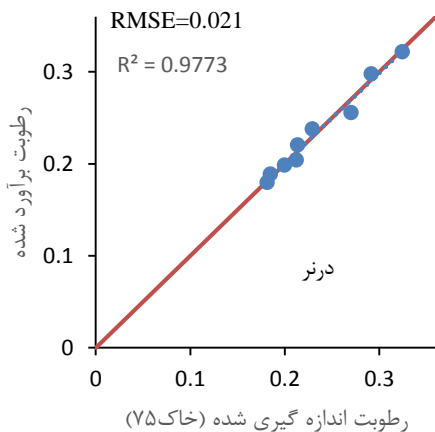
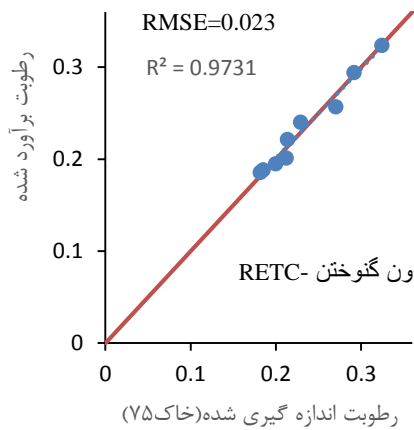
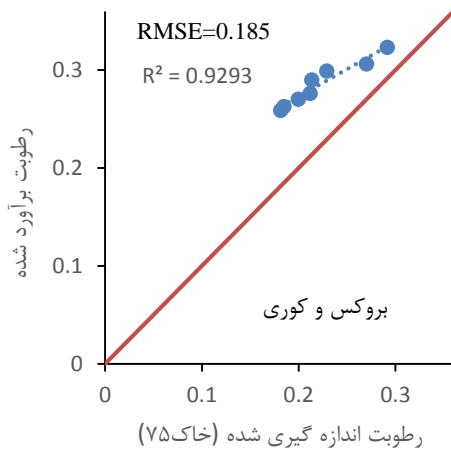
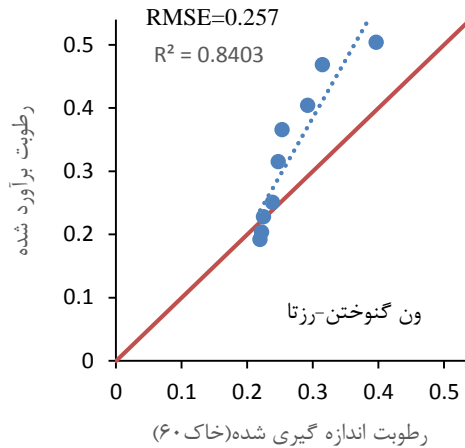
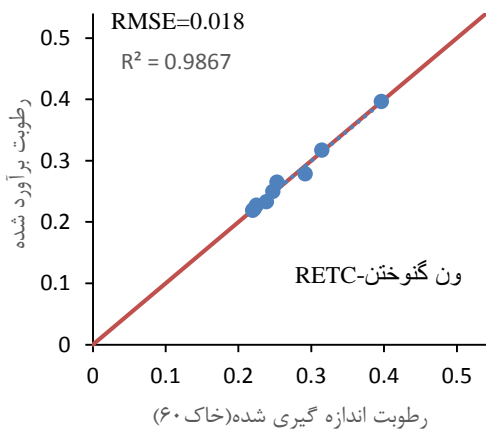
۴-۲-۱-۱-۴- مقایسه بین رطوبت پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در بافت لوم

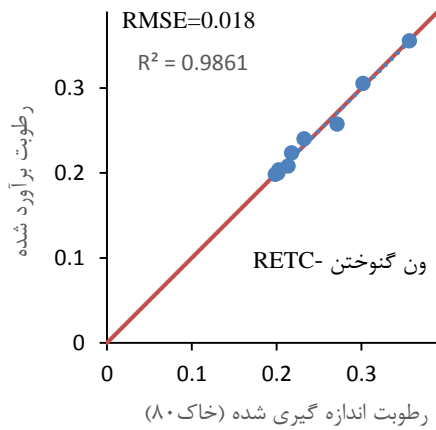
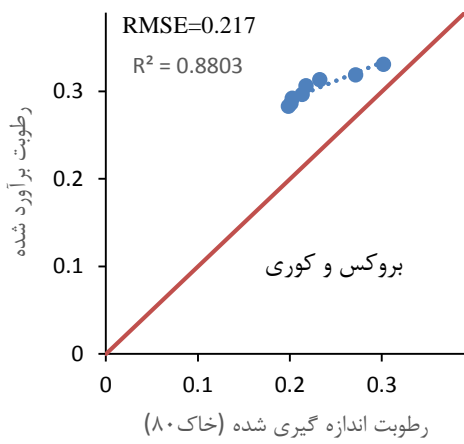
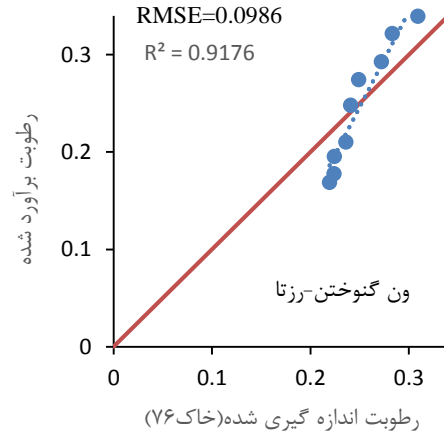
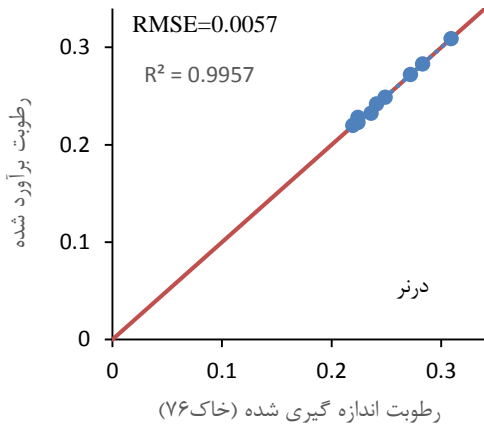
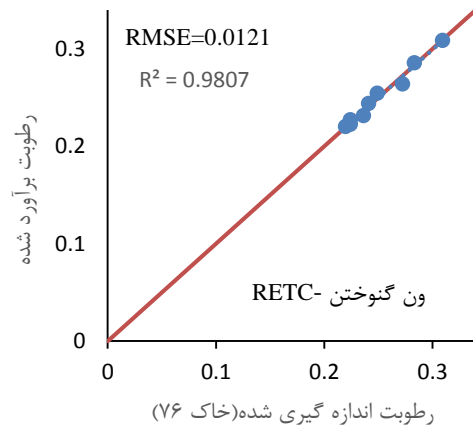
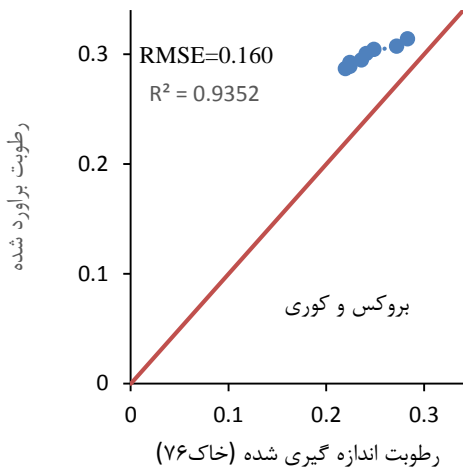
از بین ۸۰ نمونه خاک برداشت شده، تنها در دو منطقه‌ی بسطام-امیریه و دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود، نمونه‌هایی با بافت لومی وجود داشت و نمونه‌های برداشت شده از منطقه‌ی بسطام-گرگی فاقد بافت لومی بود. در شکل ۴-۴ نتایج رطوبت اندازه‌گیری شده در برابر رطوبت برآورد شده با مدل‌های مختلف نسبت به خط یک به یک نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۴-۴ در خاک‌های منطقه بسطام-امیریه و دانشکده کشاورزی مقدار رطوبت در مدل درنر و ون‌گنوختن-RETC تقریباً روی خط یک به یک به قرار گرفته است این موضوع نشان دهنده این است که مقادیر رطوبت پیش‌بینی شده با مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده تقریباً برابر است. همچنین مقدار رطوبت در مدل‌های بروکس و کوری و ون‌گنوختن-Rosetta بالای خط یک به یک قرار گرفته است و این موضوع نشان دهنده آن است که مقادیر رطوبت پیش‌بینی شده بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده است.

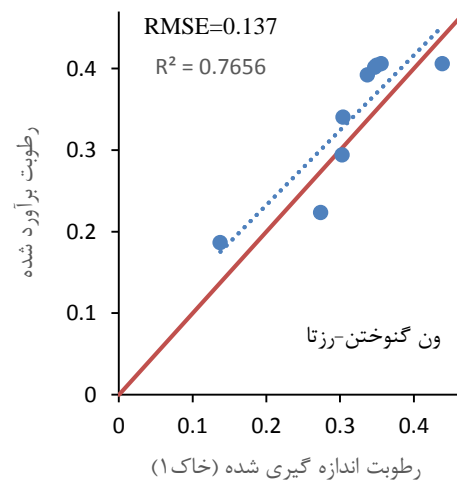
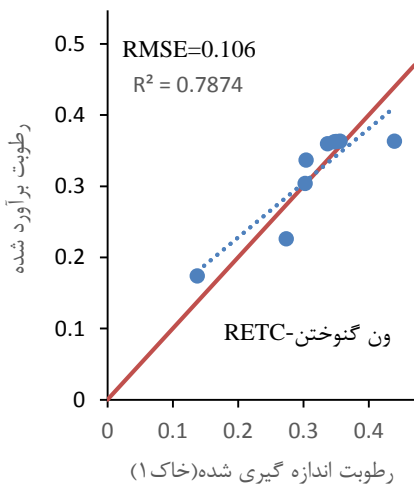
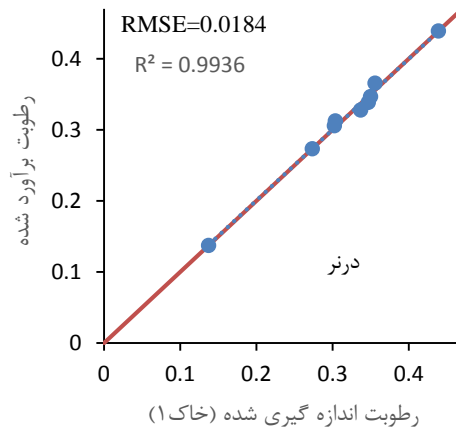
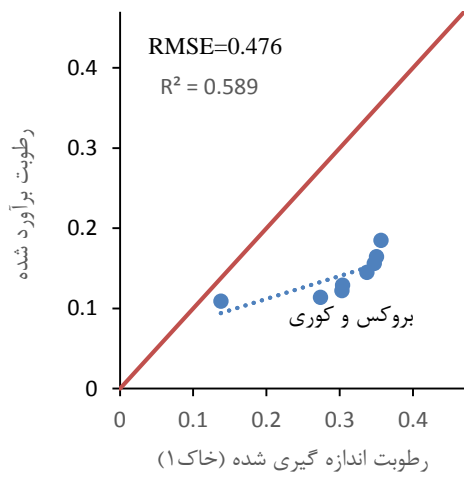
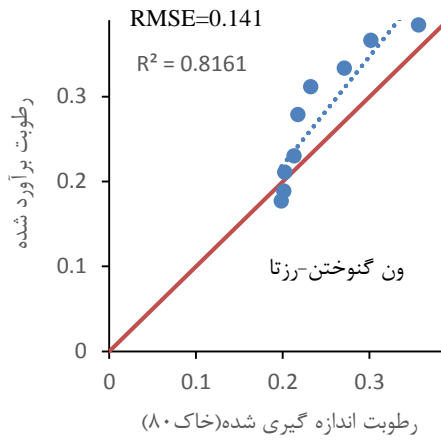
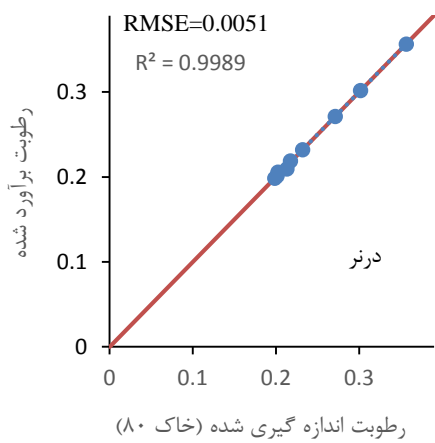












شکل ۴-۴ مقادیر مشاهداتی رطوبت حجمی در مقابل مقادیر تخمینی و پراکندگی نقاط به دست آمده در

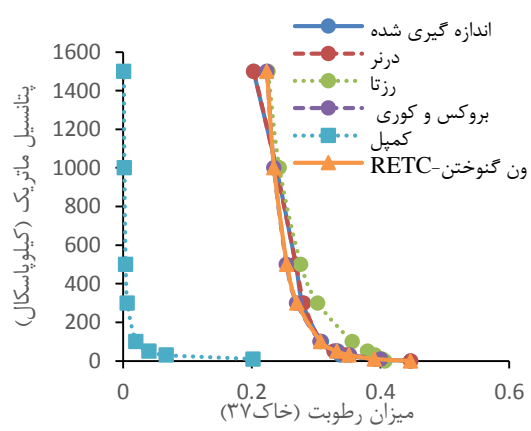
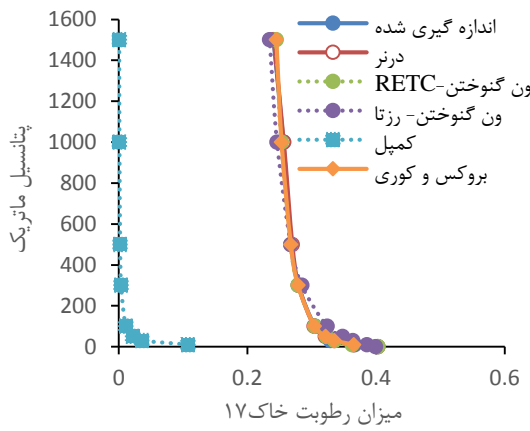
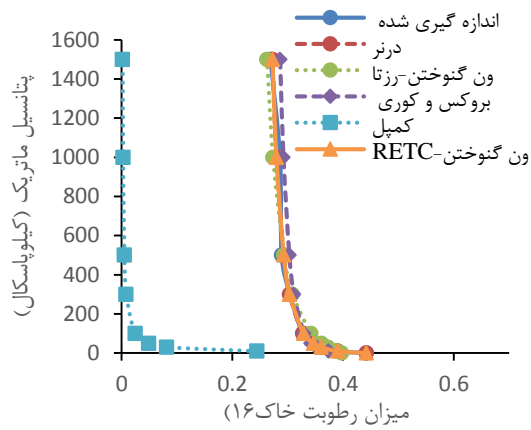
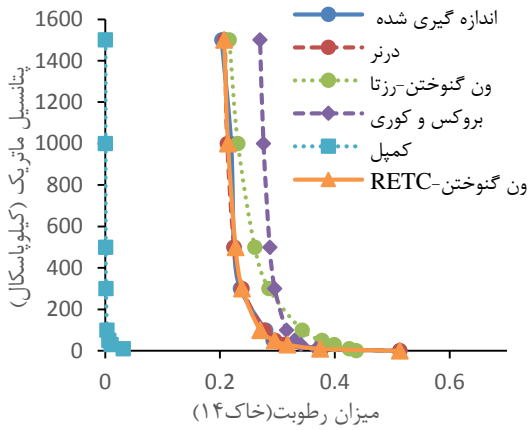
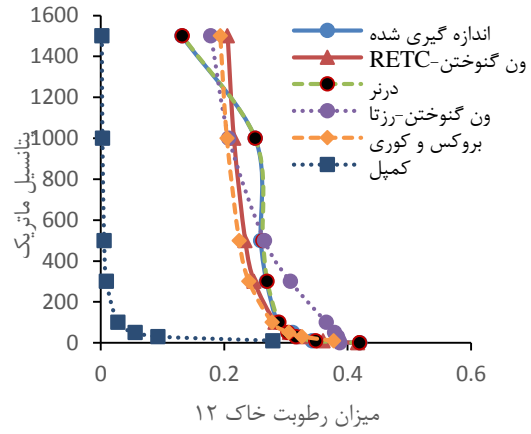
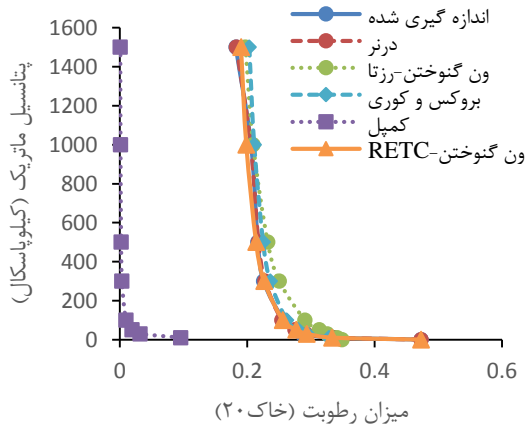
اطراف خط ۱:۱

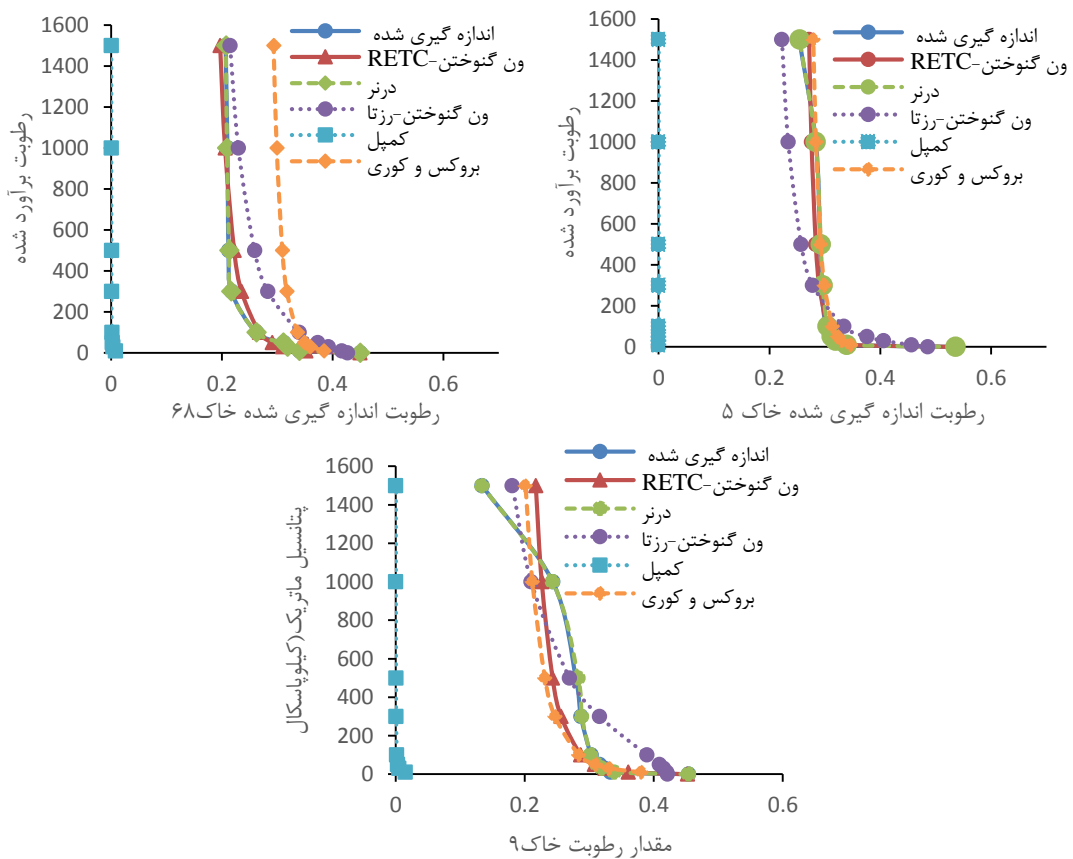
۴-۲-۱-۲- ارزیابی عملکرد توابع انتقالی پارامتریک در بافت سیلت لوم

مشابه بخش ۴-۲-۱-۱، در این بخش به منظور ارزیابی توابع انتقالی پارامتریک در بافت سیلت لوم، ابتدا منحنی نگهداشت رطوبتی خاک پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده مورد بررسی قرار گرفته است، سپس با استفاده از شاخص‌های آماری به ارزیابی کمی توابع انتقالی پارامتریک به کار رفته در این پژوهش پرداخته شد، در ادامه آب قابل دسترس در بافت سیلت لوم محاسبه شد و در نهایت مقدار رطوبت پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در تمامی نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه گردید.

۴-۲-۱-۲-۱- منحنی نگهداشت رطوبتی خاک در بافت سیلت لوم

منحنی نگهداشت رطوبتی خاک اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط مدل‌های درنر، ون‌گنوختن-Rosetta، ون‌گنوختن-RETIC، کمپل و بروکس و کوری برای نمونه خاک سیلت لوم در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴-۵ مقدار رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل‌های درنر و ون‌گنوختن-RETIC نزدیک‌ترین مقدار رطوبت را به رطوبت اندازه‌گیری شده در تمامی پتانسیل‌های ماتریک دارند. لذا این دو مدل بهترین عملکرد را در برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک دارند. مدل ون‌گنوختن-Rosetta نیز بعد از دو مدل درنر و ون‌گنوختن-RETIC نزدیک‌ترین پیش‌بینی را نسبت به رطوبت اندازه‌گیری شده دارد. به دنبال آن مدل بروکس و کوری شبیه‌سازی نسبتاً مناسبی در تمام دامنه‌های پتانسیل ماتریک نشان داده است. همچنین مدل کمپل به علت پیوسته نبودن برای خاک‌های با بافت سیلت لوم شبیه‌سازی بسیار ضعیفی در تمام نقاط پتانسیلی دارد. با توجه به این که خاک‌های مورد بررسی در این پژوهش (خاک‌های ساختمان دار) هستند مدل ون‌گنوختن-RETIC و درنر در تمام طبقه‌های بافتی نتایج برآورد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد. چرا که مدل درنر یک مدل دو تخلخلی است و برای خاک‌هایی که دارای منافذ بافتی و منافذ ساختمانی هستند ساخته شده است. تغییر شیب در این نمودارها به علت خصوصیات خاک است.





شکل ۴-۵ منحنی نگهداشت رطوبتی خاک اندازه‌گیری شده و برآورد شده برای خاک سیلت لوم

۴-۲-۱-۲-۲-۲- ارزیابی کمی توابع انتقالی پارامتریک در بافت سیلت لوم

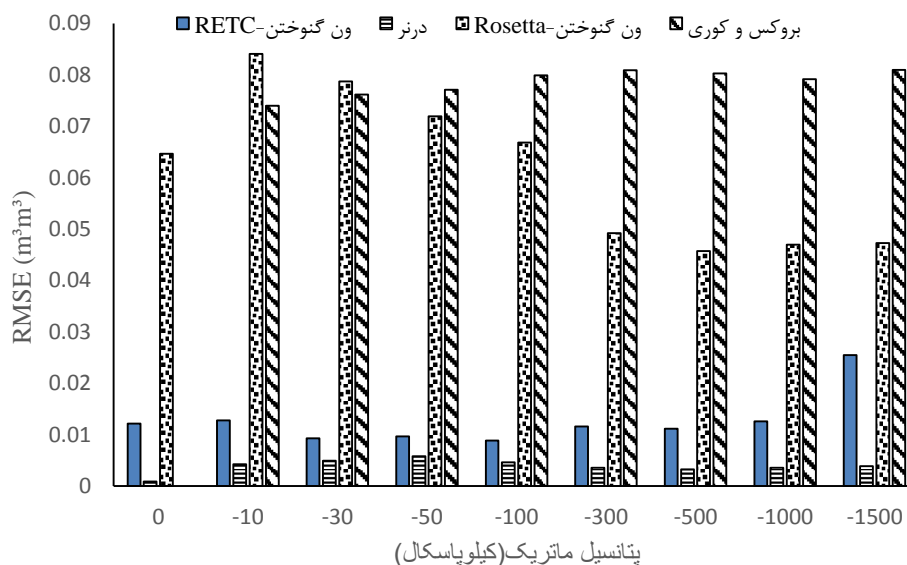
تحلیل دقت مدل‌ها در پیش‌بینی منحنی نگهداشت رطوبتی از طریق مقایسه رطوبت حجمی به‌دست‌آمده از مدل‌ها با داده‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از شاخص‌های آماری در جدول ۴-۲ و شکل ۴-۶ انجام شد.

جدول ۴-۲ مقادیر شاخص‌های آماری پنج برآورد رطوبت در کلاس بافت سیلت لوم

بافت سیلت لوم				مدل
GSDER	GMER	ME	RMSE	
۱/۰۱۴۶	۱/۰۰۰۲۴	-۰/۰۰۰۰۴۴	۰/۰۰۳۸	درنر
۱/۱۶۰	۱/۰۶۹	-۰/۰۱۶۹	۰/۰۶۱۷	ون گنوختن - Rosetta
۱/۰۰۵۱	۱/۰۰۵۲	۰/۰۰۲۷	۰/۰۱۲	ون گنوختن-RETIC
۷۸۲۳۳/۲۶	۰/۰۰۶۸	-۱/۳۹	۰/۳۰۷	کمپل
۱/۲۸۸	۱/۰۴۹	-۰/۰۱۴۲	۰/۰۷۸۵	بروکس و کوری

با توجه به جدول ۴-۲ از بین پنج مدل مورد استفاده مدل درنر بهترین عملکرد را در بین سه شاخص آماری RMSE، ME و GMER دارد. چراکه مقدار خطای RMSE و ME در این مدل نسبت به سایر مدل‌ها به صفر نزدیک‌تر و مقدار خطای GMER به یک نزدیک‌تر است. مدل کمپل در بین این پنج مدل ضعیف‌ترین عملکرد را داشته است. چراکه مقدار خطای RMSE و ME در این مدل نسبت به سایر مدل‌ها صفر، مقدار شاخص GMER از یک کم‌تر، مقدار شاخص GSDER از یک بیش‌تر است. از بین مدل‌های مورد استفاده مدل ون‌گنوختن-Rosetta، درنر، کمپل و بروکس و کوری با توجه به مقدار خطای ME مقدار رطوبت پیش‌بینی شده را بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده برآورد کرده است. لذا برای پیش‌بینی منحنی نگهداشت رطوبتی در بافت سیلت‌لوم در منطقه‌ی مورد مطالعه استفاده از مدل درنر پیشنهاد می‌گردد.

در شکل ۴-۶ وضعیت مدل‌ها در برآورد رطوبت در کلاس بافت سیلت لوم به تفکیک پتانسیل ماتریک نشان داده شده است. مدل درنر در تمام پتانسیل‌های ماتریک عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها در برآورد مقدار رطوبت دارد. مدل ون‌گنوختن-RETC بهترین عملکرد را در تمام پتانسیل‌های ماتریک نسبت به مدل‌های ون‌گنوختن-Rosetta و بروکس و کوری دارد. مدل ون‌گنوختن-Rosetta در پتانسیل ماتریک ۱۰- کیلوپاسکال ضعیف‌ترین پیش‌بینی مقدار رطوبت را دارد. مدل کمپل برای خاک منطقه بسطام با بافت سیلت‌لوم پیش‌بینی بسیار ضعیفی از مقدار رطوبت در تمام پتانسیل‌های ماتریک دارد. بنابراین تنها مقادیر متوسط میانگین شاخص‌های آماری آن در جدول ۴-۲ ارائه شده است. و از ارائه منحنی آن بر روی شکل ۴-۶ به علت قرار نگرفتن در چارچوب شکل اجتناب شده است.



شکل ۴-۶ مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا برای مدل درنر (۱۹۹۴)، مدل ون گنوختن-RETc، مدل ون-گنوختن-روزتا و بروکس و کوری در پتانسیل‌های ماتریک متفاوت (خاک سیلت لوم)

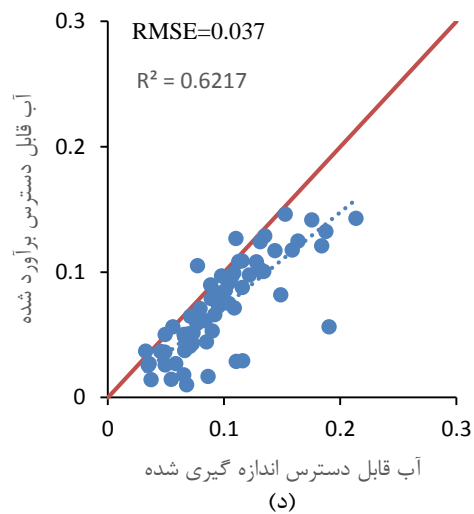
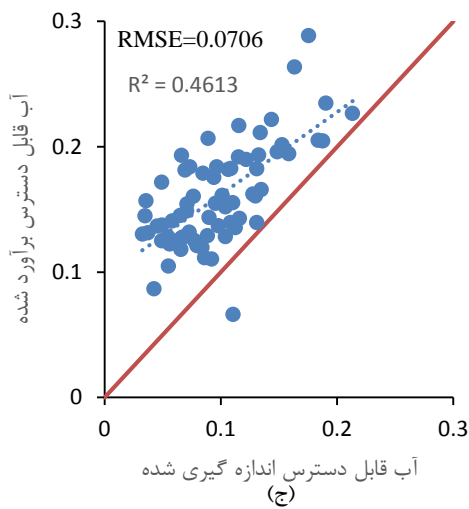
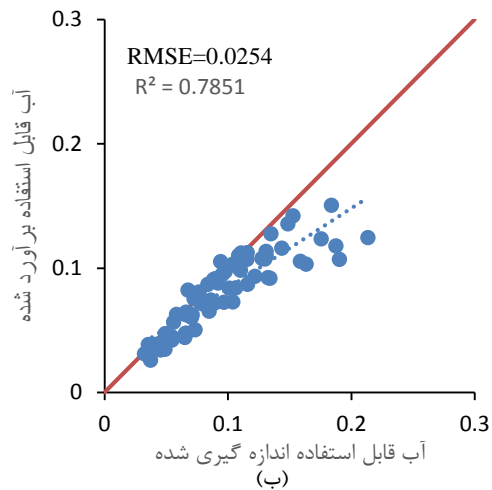
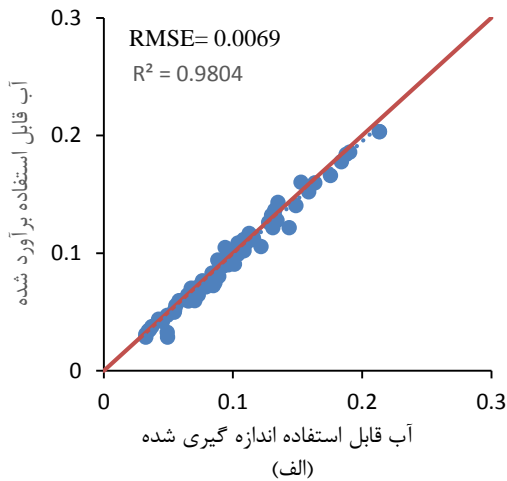
۴-۲-۱-۲-۳-۴ برآورد آب قابل دسترس در بافت سیلت لوم

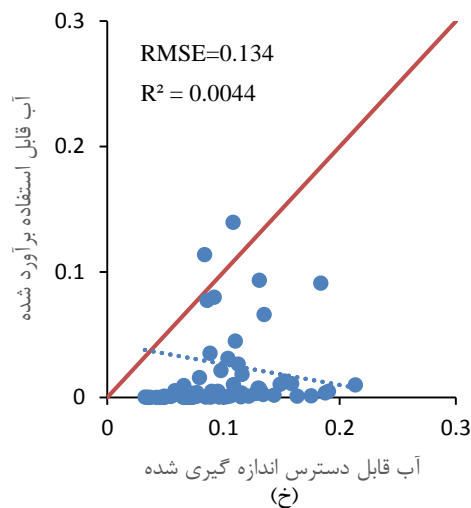
آب قابل استفاده مقدار رطوبتی است که بین دو حد ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دائم قرار می‌گیرد. ظرفیت مزرعه (FC) حد بالای آب قابل دسترس بوده و مقدار آبی است که پس از خروج آب ثقلی در خاک نگهداری می‌شود. نقطه پژمردگی دائم (PWP) حد پایین آب قابل دسترس است و اعتقاد بر این است که گیاه در آن به‌طور غیرقابل برگشت دچار تنش خشکی و پژمردگی می‌گردد. حد اغلب تنها به ویژگی‌های خاک بستگی دارد، حد PWP نه تنها به ویژگی‌های خاک، بلکه به نوع گیاه، تراکم سیستم ریشه‌ای و وضعیت اقلیمی بستگی دارد (کلوت، ۱۹۸۶). نتایج حاصل از همبستگی بین آب قابل دسترس اندازه‌گیری شده و آب قابل دسترس برآورد شده نشان داد که بین مقدار آب قابل دسترس اندازه‌گیری شده و آب قابل دسترس برآورد شده در مدل درنر و ون گنوختن-RETc ارتباط مستقیم وجود دارد، این ارتباط بیان‌کننده همبستگی مثبت و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد است.

با توجه به شکل ۴-۳ الف داده‌های مدل درنر تقریباً روی خط یک‌به‌یک قرار گرفته است این موضوع نشان‌دهنده‌ی این است که مقادیر پیش‌بینی‌شده با مقادیر اندازه‌گیری شده تقریباً برابر است.

با توجه به شکل ۴-۷ ب، ۴-۷ د و ۴-۷ خ داده‌های مدل ون گنوختن-RETc، بروکس و کوری و

کمپل در قسمت پایین خط یک‌به‌یک قرار گرفته است؛ این موضوع نشان‌دهنده‌ی این است که مقدار رطوبت پیش‌بینی‌شده کمتر از مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده است. همچنین با توجه به شکل ۴-۷-ج داده‌های مدل ون گنوختن-Rosetta در بالای خط یک‌به‌یک قرار گرفته است که این موضوع نشان‌دهنده این است که مقادیر رطوبت پیش‌بینی‌شده بیشتر از مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده است.

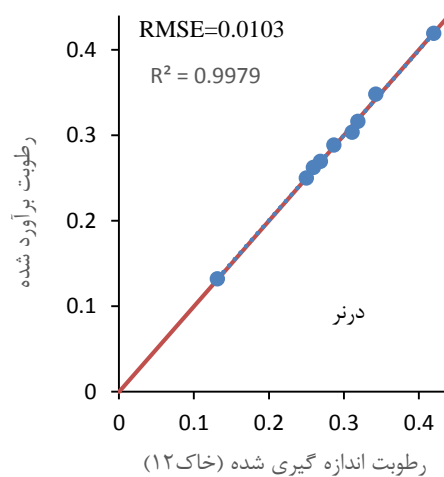
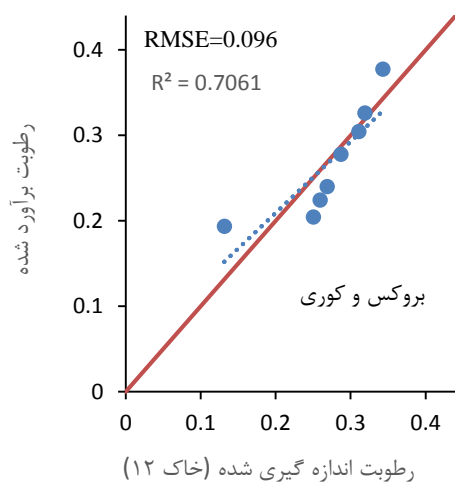
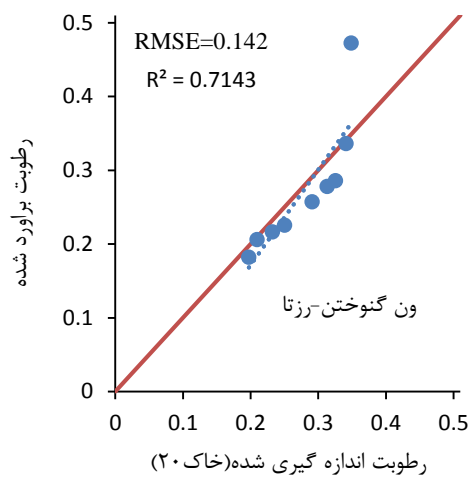
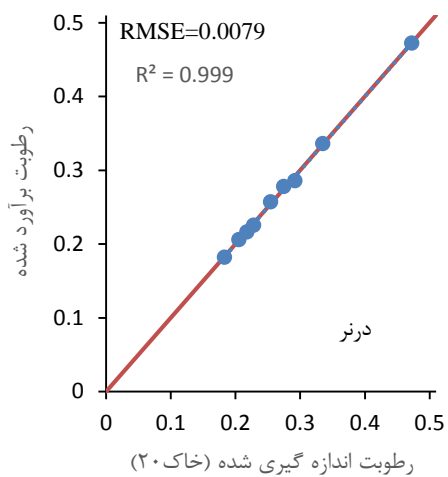
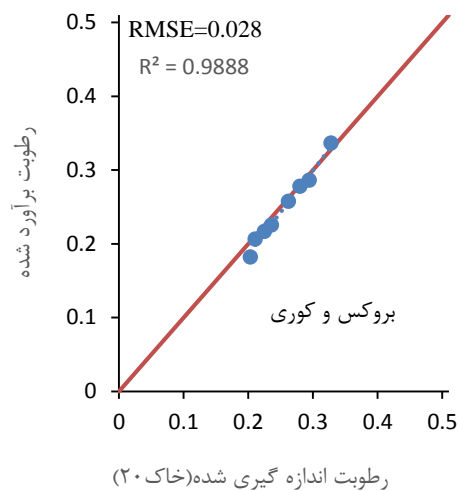
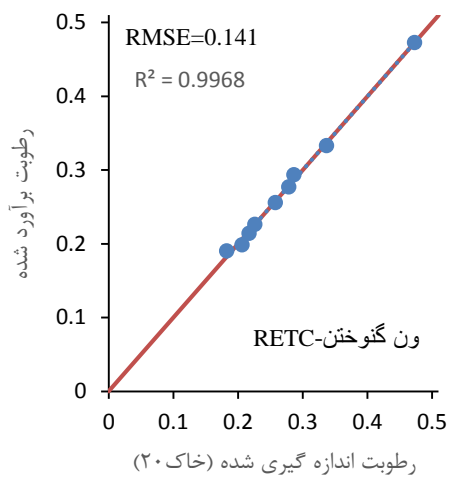


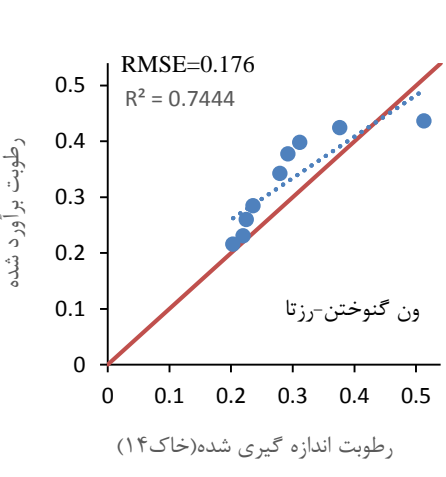
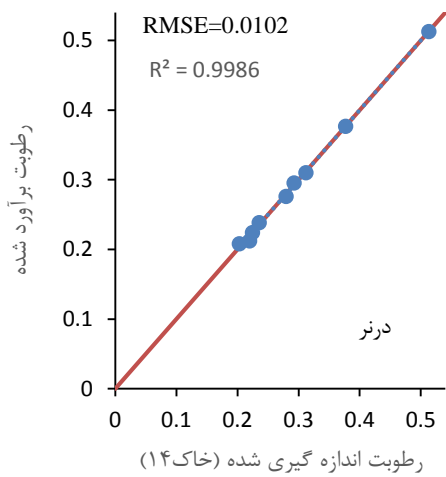
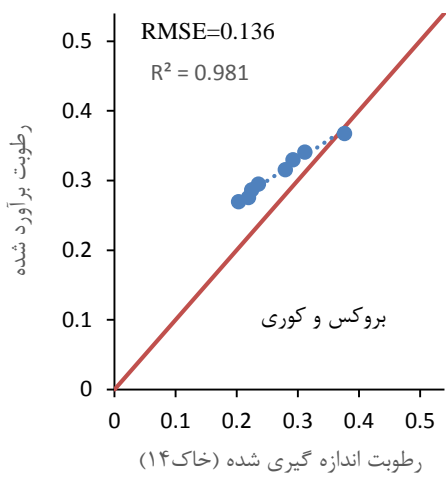
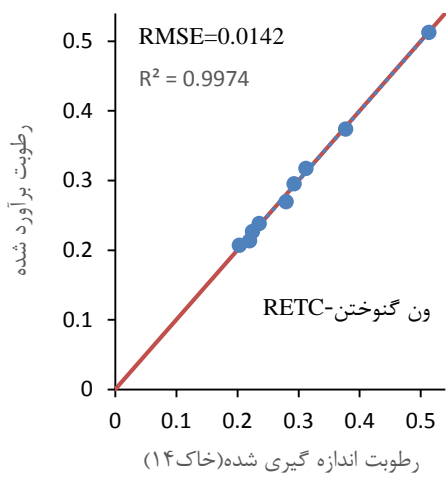
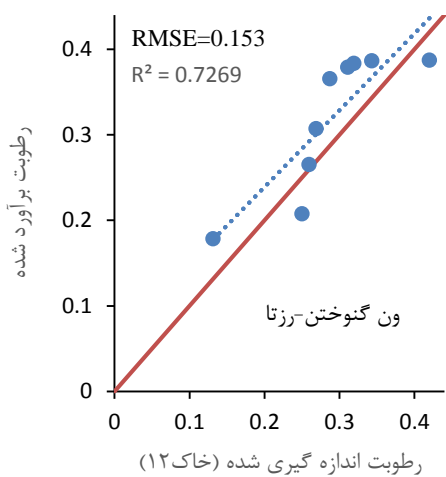
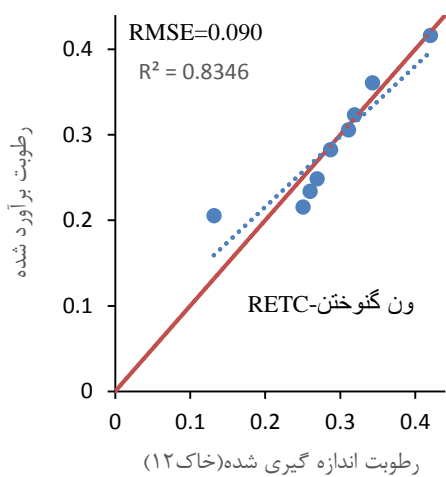


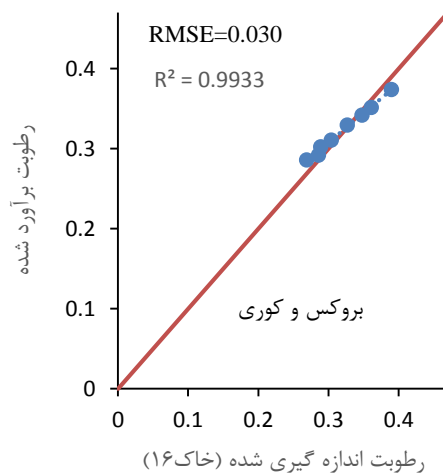
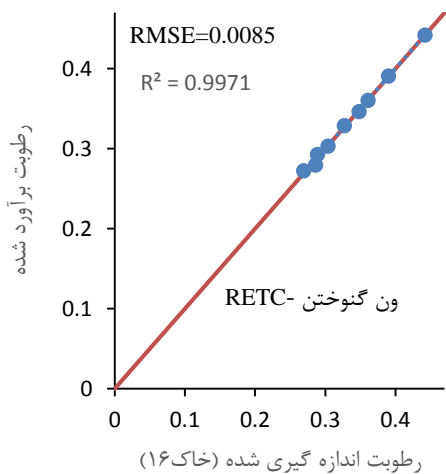
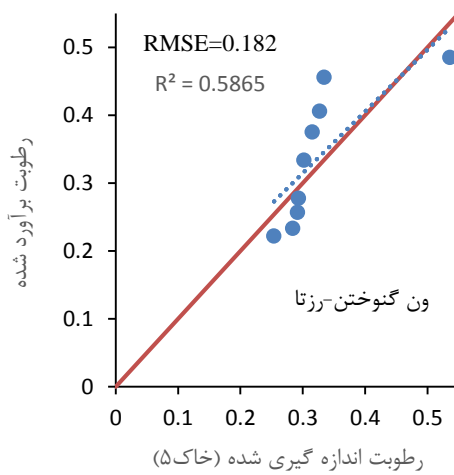
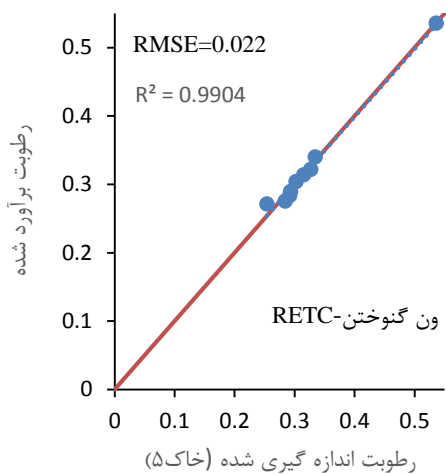
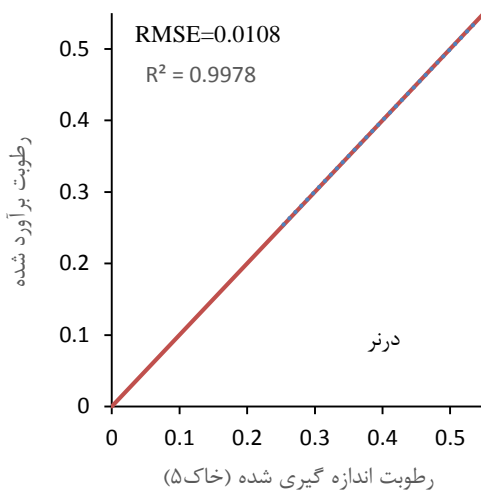
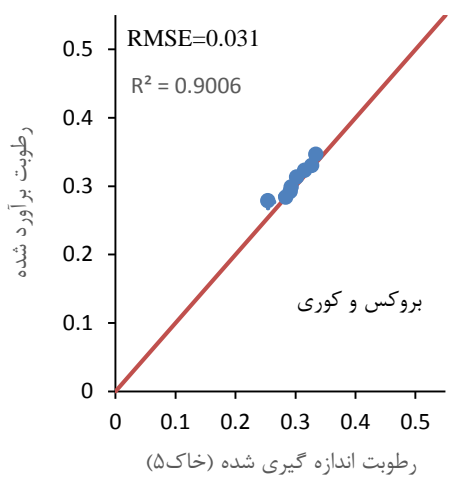
شکل ۴-۷ آب قابل دسترس برآورد شده و اندازه گیری شده نسبت به خط ۱:۱ در خاک سیلت لوم (الف- مدل درنر و ب- مدل ون گنوختن-RETC، ج- مدل ون گنوختن-Rosetta، د- مدل بروکس-کوری و خ- مدل کمپل)

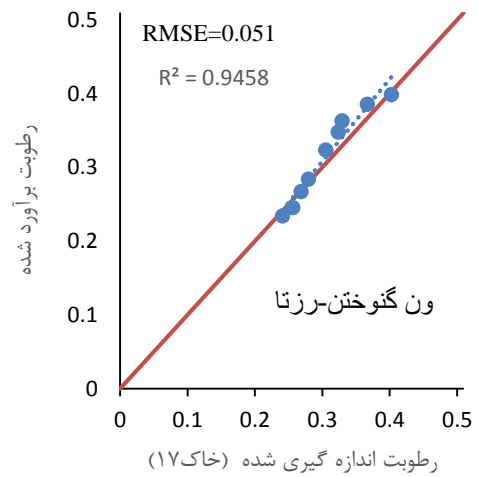
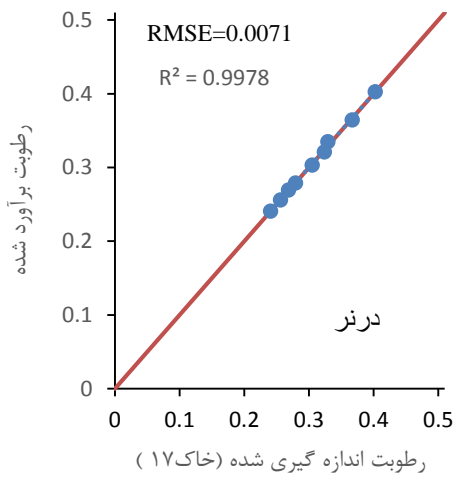
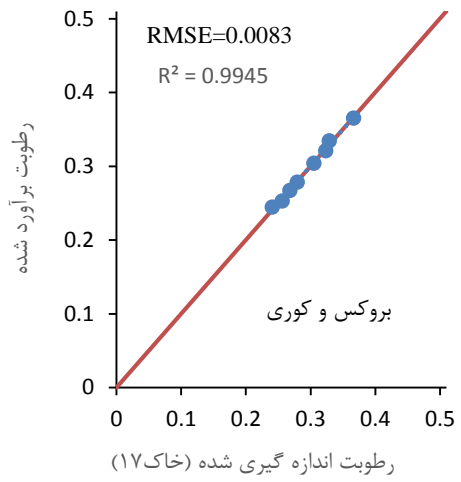
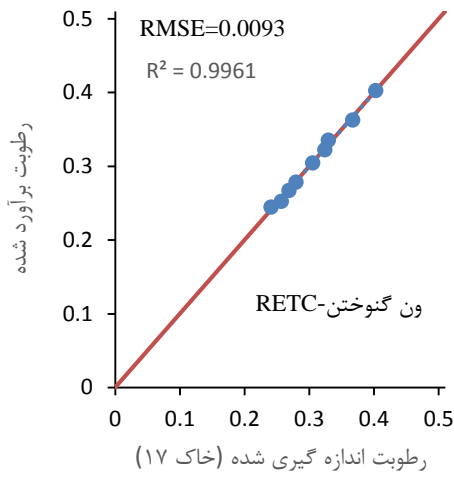
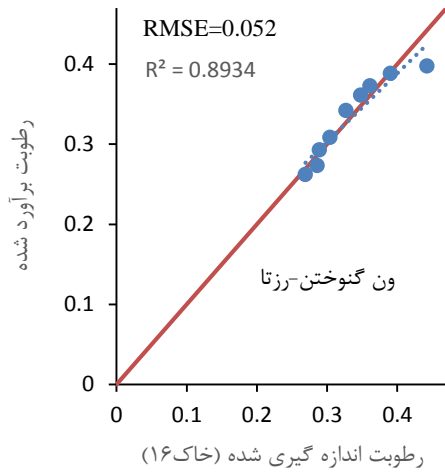
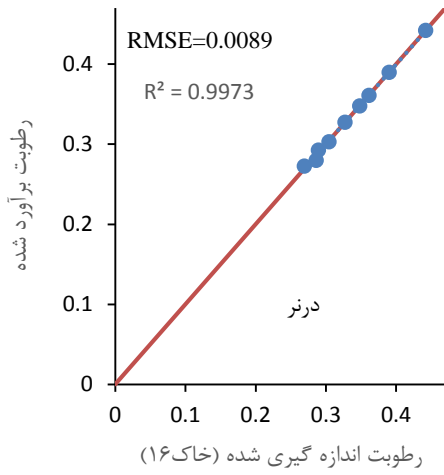
۴-۲-۱-۲-۴- مقایسه بین رطوبت پیش بینی شده و اندازه گیری شده در بافت سیلت لوم

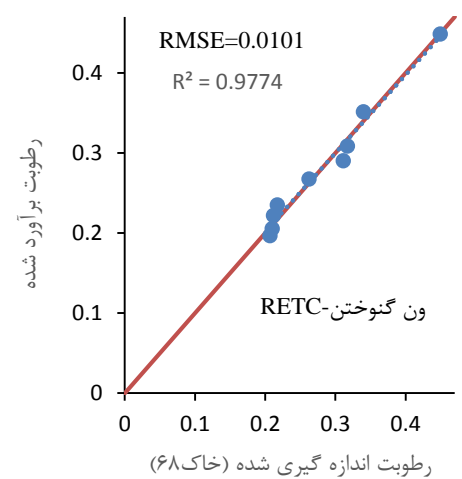
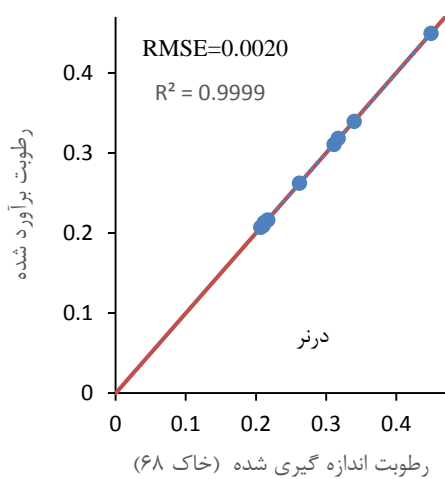
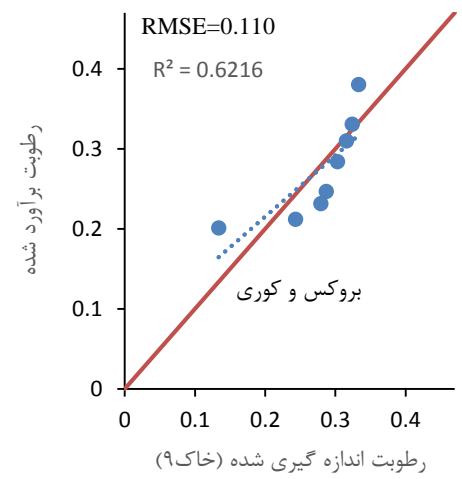
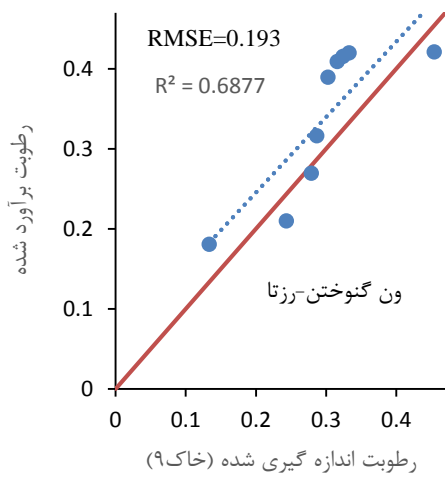
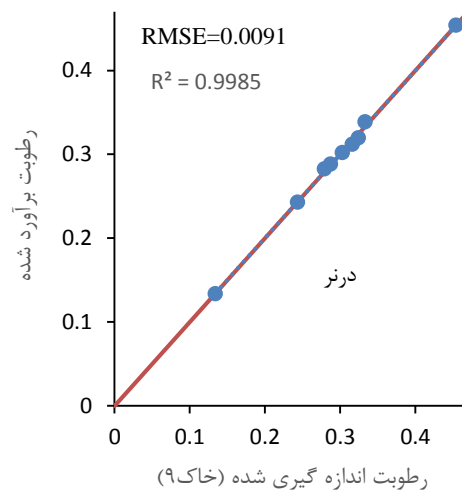
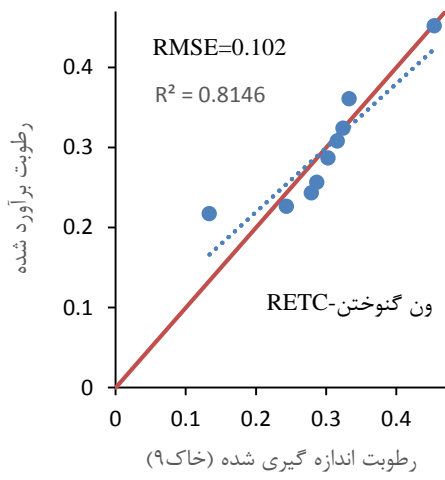
از بین ۸۰ نمونه خاک برداشت شده، در منطقه‌ی بسطام-امیریه، بسطام-گرچی و دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود، ۶۸ نمونه از خاک‌ها دارای بافت سیلت لوم بودند. در شکل ۴-۸ نتایج رطوبت اندازه گیری شده در برابر رطوبت برآورد شده با مدل‌های مختلف نسبت به خط یک به یک نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۴-۸ در خاک‌های منطقه بسطام-امیریه و دانشکده کشاورزی مقدار رطوبت در مدل درنر و ون گنوختن-RETC تقریباً روی خط یک به یک قرار گرفته است این موضوع نشان دهنده این است که مقادیر رطوبت پیش بینی شده با مقادیر رطوبت اندازه گیری شده تقریباً برابر است. مقدار رطوبت در مدل‌های بروکس و کوری و ون گنوختن-Rosetta بالای خط یک به یک قرار گرفته است و این موضوع نشان دهنده آن است که مقادیر رطوبت پیش بینی شده بیشتر از مقادیر اندازه گیری شده است. همچنین مقدار رطوبت در مدل‌های بروکس و کوری و ون گنوختن-Rosetta پایین خط یک به یک قرار گرفته است و این موضوع نشان دهنده آن است که مقادیر رطوبت پیش بینی شده کمتر از مقادیر اندازه گیری شده است.

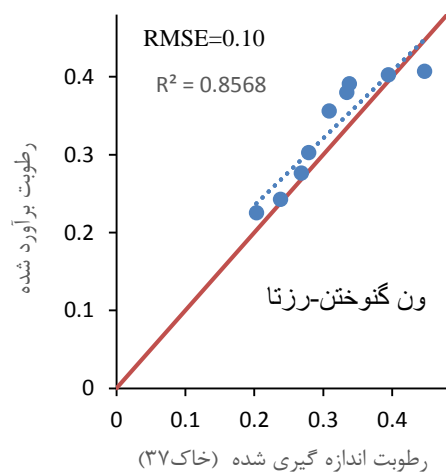
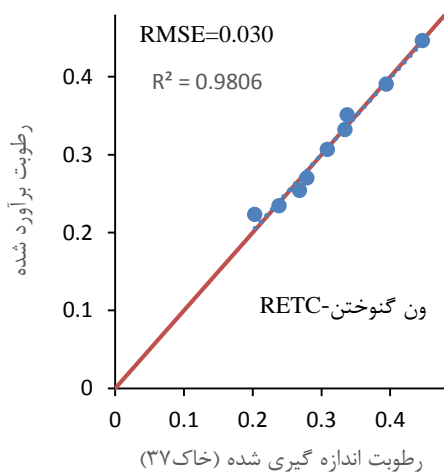
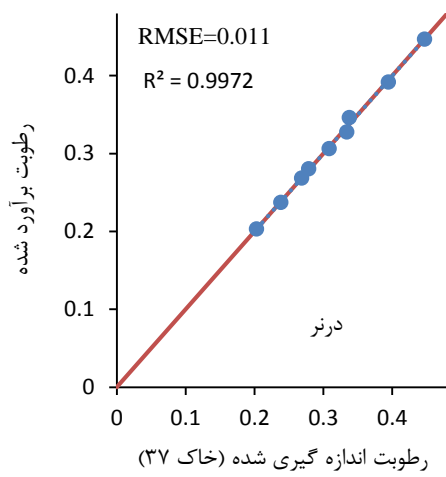
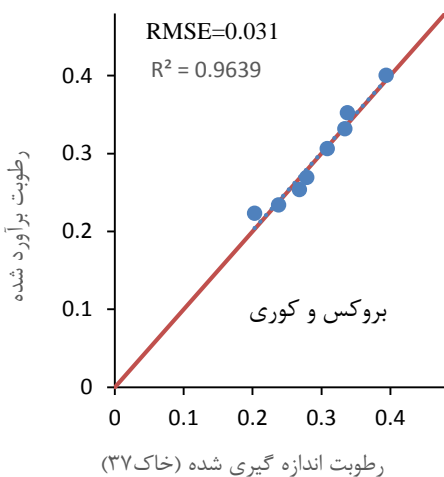
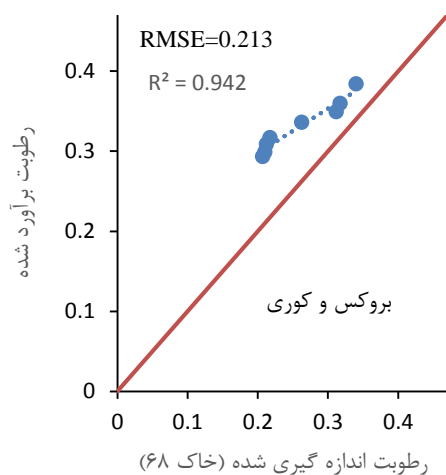
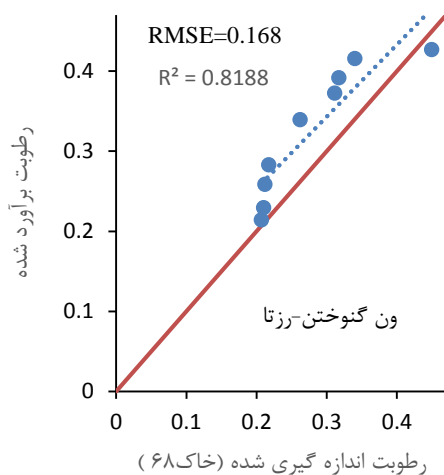












شکل ۴-۸ مقادیر مشاهداتی رطوبت حجمی در مقابل مقادیر تخمینی و پراکندگی نقاط به دست آمده در اطراف خط ۱:۱

۲-۲-۴ - توابع انتقالی نقطه‌ای

توابع انتقالی نقطه‌ای نخستین شکل توابع انتقالی هستند که مقدار رطوبت را در پتانسیل‌های معین برآورد می‌کنند. مزیت عمده‌ی این روش آن است که برآوردی کاملاً صحیح برای نقاط مشخص از منحنی نگهداشت رطوبتی خاک ارائه می‌دهد (فرخیان فیروزی و همایی، ۱۳۸۴). همچنین با این توابع می‌توان مهم‌ترین ویژگی خاک را که در برآورد مقدار رطوبت در مکش معین نقش دارد، تعیین کرد. با توجه به اینکه غیر نرمال بودن توزیع داده‌ها آزمون‌های فرضیه را نامعتبر می‌سازد لذا چگونگی توزیع داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری Minitab 18 مورد بررسی قرار گرفت (اسفهلان و همکاران، ۱۳۹۷). در بین پارامترهای مورد بررسی پارامترهایی که توزیع آن‌ها نرمال نبود با استفاده از تبدیلات زیر نرمال شد.

$$X=\log(x) \quad (۱-۴)$$

$$X=(x)^{0/5} \quad (۲-۴)$$

$$X=\text{box-cox} \quad (۳-۴)$$

$$X=\text{Johnson} \quad (۴-۴)$$

سپس با استفاده از نرم‌افزار spss 22 همبستگی‌های خطی بین متغیرهای مستقل (پارامترهای فیزیکی و شیمیایی) و متغیرهای وابسته (رطوبت حجمی) در مکش‌های صفر، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۱، ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ بار به دست آمد. ضرایب همبستگی بین متغیرهای مستقل و وابسته در جدول‌های (۳-۴) و (۴-۴) ارائه شده است.

جدول ۳-۴ همبستگی بین پارامترهای فیزیکی و مقادیر رطوبت در پتانسیل ماتریک متفاوت

رطوبت حجمی	sand	silt	Clay	Bd	n	dg	Qg
θ_0	-۰/۳۸۲**	۰/۳۱۳*	۰/۱۸۵	-۰/۶۷۸**	۰/۵۳۳**	-۰/۳۶۱**	-۰/۳۱۰*
$\theta_{0/1}$	-۰/۲۴۲	۰/۳۷۵**	-۰/۱۶۸	۰/۰۲۴	-۰/۰۶۹	-۰/۱۵۸	-۰/۳۳۵*
$\theta_{0/3}$	-۰/۲۹۷*	۰/۴۲۶**	-۰/۰۹۹	-۰/۰۰۴۹	-۰/۰۴۵	-۰/۲۴۸	-۰/۳۴۰*
$\theta_{0/5}$	-۰/۳۶۴**	۰/۵۰۴**	-۰/۰۷۵	-۰/۰۰۷	-۰/۰۴۷	-۰/۳۲۱*	-۰/۴۱۳**
θ_1	-۰/۳۵۳**	۰/۴۷۸**	-۰/۰۰۹	۰/۰۴۳	-۰/۰۹۶	-۰/۳۴۹**	-۰/۳۶۸**

θ_3	-0/359**	0/466**	-0/002	0/044	-0/097	-0/349**	-0/358**
θ_5	-0/323*	0/432**	-0/006	0/047	-0/097	-0/319*	-0/330*
θ_{10}	-0/247	0/348**	-0/005	0/059	-0/115	-0/255	-0/243
θ_{15}	-0/312*	0/377**	-0/018	0/096	-0/158	-0/271*	-0/332*

* و ** به ترتیب معنی دار در سطح پنج و یک درصد

جدول ۴-۴ همبستگی بین پارامترهای شیمیایی و مقادیر رطوبت در پتانسیل ماتریک متفاوت

رطوبت حجمی	om	caco3	PH	EC	ca	mg	Na	K	SAR	رس قابل پراکنش
θ_0	0/438**	0/114	-0/381**	-0/037	0/003	-0/035	0/106	-0/031	0/238	0/100
$\theta_{0/1}$	0/287*	0/015	-0/077	-0/165	-0/203	-0/258	-0/159	0/146	-0/052	0/158
$\theta_{0/3}$	0/222*	0/050	-0/078	-0/075	-0/114	-0/109	-0/030	0/015	-0/001	0/103
$\theta_{0/5}$	0/403**	0/084	-0/133	-0/117	-0/137	-0/132	-0/087	0/015	0/057	0/150
θ_1	0/395**	0/108	-0/151	0/001	-0/211	-0/131	-0/063	-0/003	-0/014	0/126
θ_3	0/376**	0/161	-0/118	0/145	-0/242	-0/068	-0/012	-0/042	0/019	0/032
θ_5	0/346**	0/132	-0/122	0/133	-0/210	-0/054	0/003	-0/046	0/044	0/062
θ_{10}	0/248	0/107	-0/137	0/177	-0/140	-0/007	0/092	-0/109	0/118	0/044
θ_{15}	0/195	0/160	-0/109	0/290*	-0/072	-0/149	0/225	-0/281	0/229	-0/064

* و ** به ترتیب معنی دار در سطوح پنج و یک درصد

نتایج حاصل از همبستگی بین پارامترهای فیزیکی و مقادیر رطوبت در پتانسیل‌های ماتریک متفاوت نشان داد که در تمام مکش‌ها به جز مکش صفر، اثر درصد سیلت بر رطوبت معنی دار و مثبت بوده است. وجود سیلت به دلیل خلل و فرج ریز و سطح ویژه مناسب سبب افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک شده است. با توجه به اینکه غالب نمونه خاک‌های برداشت شده دارای بافت لوم سیلتی و لومی هستند مقدار رس موجود در نمونه‌ها اندک بوده و بیشتر بافت خاک از شن و سیلت تشکیل شده است. این موضوع سبب شده تا از طرفی اثر درصد رس بر مقدار رطوبت در تمامی مکش‌ها غیر معنی دار باشد و از طرف دیگر وجود شن به دلیل تخلیه سریع آب و سطح ویژه کم، اثر منفی زیادی در نگهداری آب در

خاک ایجاد می‌کند. تأثیر منفی درصد شن در این پژوهش، در تمامی مکش‌ها به‌جز مکش ۱۰- و ۱۰۰- بار به‌طور معنی‌داری مشاهده شد. بیش‌ترین اثر منفی در مکش‌های ۱/۰، ۳/۰، ۵/۰، ۱، ۵ و ۱۵ بار مربوط به انحراف معیار هندسی قطر ذرات بود. این موضوع نشان‌دهنده‌ی این است که با افزایش مقدار انحراف معیار هندسی قطر ذرات و به طبع آن ناهمگون شدن اندازه‌ی ذرات ظرفیت نگهداری آب در خاک کاهش یافته است. در مکش صفر اثر جرم مخصوص ظاهری بر رطوبت اشباع معنی‌دار و منفی بود، در این مکش با افزایش مقدار جرم مخصوص ظاهری مقدار رطوبت کاهش یافته است. همچنین در این مکش اثر تخلخل بر رطوبت اشباع معنی‌دار و مثبت بود، به‌طوری‌که با افزایش تخلخل ظرفیت نگهداری رطوبت افزایش یافته است. در مکش‌های صفر، ۵/۰، ۱، ۳، ۵ و ۱۵ بار اثر میانگین هندسی قطر ذرات معنی‌دار و منفی بود، در نتیجه با کاهش میانگین هندسی قطر ذرات و ریزدانه‌تر شدن خاک ظرفیت نگهداری رطوبت افزایش یافته است. بررسی همبستگی بین پارامترهای شیمیایی و مقادیر رطوبت در مکش‌های متفاوت نشان داد که در تمام مکش‌ها به‌جز مکش ۱۰ و ۱۵ بار اثر ماده آلی بر میزان رطوبت مثبت و معنی‌دار است. این موضوع نشان‌دهنده این است که از مکش صفر تا مکش ۵ بار افزایش ماده آلی سبب افزایش قدرت نگهداری آب در خاک شده است. اثر pH تنها در مکش صفر معنی‌دار و منفی بود و در سایر مکش‌ها اثر این پارامتر بر میزان رطوبت غیر معنی‌دار است. همچنین مقدار همبستگی بین دو پارامتر EC و K با مقدار رطوبت تنها در مکش ۱۵ بار معنی‌دار بود، مقدار همبستگی این دو پارامتر با میزان رطوبت ضعیف و به ترتیب مثبت و منفی بود.

۴-۲-۱- ایجاد توابع انتقالی

برای توسعه توابع انتقالی معمولاً از رگرسیون و شبکه‌های عصبی استفاده می‌شود (سرمیدیان و مهرجاردی، ۲۰۰۸) در این پژوهش از دو روش فوق جهت توسعه توابع انتقالی نقطه‌ای استفاده شد. برای این منظور ابتدا از نرم‌افزار Excel، ۸۰ نمونه خاک مورد مطالعه در این پژوهش، به‌صورت تصادفی به دو گروه ۵۶ تایی داده‌های آموزش و ۲۴ تایی داده‌های آزمون تقسیم شدند. سپس هر دو گروه از

داده‌ها با استفاده از روش رگرسیون خطی چندگانه و روش شبکه عصبی مصنوعی مورد ارزیابی قرار گرفت.

۴-۲-۱-۱-روش رگرسیون

برای تشکیل توابع انتقالی نقطه‌ای در این پژوهش، نخست از روش رگرسیون خطی چندگانه استفاده شد، ورودی‌های مدل رگرسیونی به روش گام‌به‌گام وارد مدل شدند. برای انجام مدل رگرسیونی چندگانه از نرم‌افزار SPSS 22 استفاده شد. در هر مکش ۱۷ ورودی مختلف از ترکیب متغیرهای مستقل، به‌عنوان ورودی مدل رگرسیونی مورد بررسی قرار گرفت.

الف: مرحله آموزش توابع انتقالی به روش رگرسیونی:

معادلات رگرسیونی مختلف ایجاد شده در هر مکش در جدول (۴-۵) و (۴-۶) ارائه شده است. به‌منظور ارزیابی عملکرد هریک از معادلات رگرسیونی از مقادیر خطای RMSE و R استفاده شد و بهترین تعداد ورودی در هر مکش بر اساس مقدار RMSE انتخاب شد. بر این اساس برای ورودی‌هایی که تنها از پارامتر فیزیکی استفاده شده است در مکش صفر تعداد ۶ پارامتره، مکش ۰/۱ تعداد ۳ پارامتره، مکش ۰/۳ تعداد ۵ پارامتره، مکش ۰/۵ تعداد ۵ پارامتره، مکش ۱ پارامتره، مکش ۱۵ پارامتره، مکش ۳ تعداد ۴ پارامتره، مکش ۵ تعداد ۵ پارامتره، مکش ۱۰ تعداد ۶ پارامتره و مکش ۱۵ تعداد ۶ پارامتره بهترین تعداد ورودی بود. همچنین در بین ورودی‌هایی که از هر دو پارامترهای فیزیکی - شیمیایی استفاده شده است، در مکش صفر تعداد ۱۲ پارامتره، مکش ۰/۱ تعداد ۱۶ پارامتره، مکش ۰/۳ (ظرفیت زراعی) تعداد ۱۶ پارامتره، مکش ۰/۵ تعداد ۱۶ پارامتره، مکش ۱ تعداد ۱۵ پارامتره، مکش ۳ تعداد ۱۵ پارامتره، مکش ۵ تعداد ۱۵ پارامتره، مکش ۱۰ تعداد ۱۴ پارامتره و مکش ۱۵ (نقطه پژمردگی دائم) تعداد ۱۷ پارامتره بهترین ورودی بود. در پژوهش حاضر رگرسیون خطی چندگانه عملکرد خوبی را به ثبت نرساند.

جدول ۴-۵ توابع انتقالی نقطه‌ای مرحله آموزش روش رگرسیون (پارامترهای فیزیکی)

تابع	sig	RMSE(m ³ /m ³)	R
$\theta_0 = -0/296+0/327$ Sand + 0/011Silt +0/029 Clay -0/271 Bd +0/65 dg-0/035 Qg	0/000**	0/0400	0/764
$\theta_{0/1} = 0/209+0/01$ Sand + 0/002Silt - 0/001Clay	0/029*	0/0463	0/394
$\theta_{0/3} = 0/059+0/031$ Sand +0/002 Silt -0/001 Clay +0/025 Bd -0/045 dg	0/044*	0/0422	0/444
$\theta_{0/5} = -0/033+0/048$ Sand +0/006 Silt + 0/006Clay + 0/03Bd + 0/182dg	0/005**	0/0395	0/530
$\theta_1 = -1/336-0/16$ Sand + 0/014Silt + 0/007Clay +0/098 Bd + 0/347dg+0/044 Qg	0/002**	0/0605	0/582
$\theta_3 = -0/086+0/047$ Sand + 0/003Silt +0/002 Clay +0/041 Bd	0/003**	0/0364	0/510
$\theta_5 = -0/118+0/058$ Sand + 0/003Silt +0/002 Clay +0/04 Bd	0/009**	0/0395	0/478
$\theta_{10} = 0/046-0/137$ Sand +0/008 Silt +0/002 Clay +0/061 Bd +0/184 dg+0/032 Qg	0/032*	0/0417	0/486
$\theta_{15} = -3/737-2/921$ Sand +0/061 Silt -0/037 Clay +1/648 Bd + 0/753dg+ 0/359Qg	0/063	0/8663	0/457

جدول ۴-۶ توابع انتقالی نقطه‌ای مرحله آموزش روش رگرسیون (پارامترهای فیزیکی - شیمیایی)

تابع	sig	RMSE	R
$\theta_0 = 0/108+ 0/378$ Sand + 0/004Silt +0/014 Clay -0/501 Bd +0/137 dg-0/035 Qg + 0/008 caco3 -0/44 n +0/001 ca -0/003 mg -0/021na +0/037 K	0/00**	0/0361	0/816
$\theta_{0/1} = 0/711-0/343$ Sand -0/003Silt -0/02 Clay +0/008 Bd -0/34 dg+0/042 Qg +0/026 om - 0/006 caco3 +0/261 n + 0/002ca +0/021 mg +0/006 Na +0/068 K + 9746/946SAR + 0/039Spreadable clay -0/021 PH	0/028*	0/0368	0/681
$\theta_{0/3} = 0/199-0/35$ Sand -0/019 Clay +0/053 Bd -0/314 dg+ 0/054Qg + 0/025om -0/004 caco3 -0/149 n + 0/004ca +7/978E-5 mg -0/021 Na +0/084 K +10658/546 SAR + 0/032Spreadable clay -0/009 PH +0/005 EC	0/060	0/0338	0/671
$\theta_{0/5} = 0/186-0/273$ Sand +0/003 Silt -0/012 Clay +0/044 Bd -0/146dg+0/047 Qg +0/026 om -0/003 caco3 -0/16 n + 0/005ca +0/003 mg -0/42Na + 0/055K +11994/781 SAR +0/03 Spreadable clay -0/012 PH	0/004**	0/0308	0/734
$\theta_1 = -1/088-0/38$ Sand + 0/009Silt -0/009Clay + 0/1Bd + 0/018dg+0/072 Qg + 0/044om - 0/004 caco3 -0/241 n +0/005 ca +0/007 mg - 0/058 Na +0/067 K + 21124/97SAR + 0/042Spreadable clay	0/005**	0/0518	0/714

$\theta_3 = 0/13-0/253\text{Sand} + 0/002\text{Silt} -0/01 \text{ Clay} +$ $0/064\text{Bd} -0/136 \text{ dg}+0/041 \text{ Qg} + 0/022\text{om}$ $+7/433\text{E-}5 \text{ caco3} -0/132 \text{ n} +0/006 \text{ mg} -$ $0/016\text{Na} +0/029 \text{ K} +9215/058 \text{ SAR} +$ $0/022\text{Spreadable clay} -0/01\text{PH}$	0/021*	0/0321	0/691
$\theta_5 = 0/099-0/254\text{Sand} +0/003 \text{ Silt} -0/008 \text{ Clay}$ $+0/083 \text{ Bd} -0/066 \text{ dg}+0/041 \text{ Qg} +0/023 \text{ om} -$ $0/001 \text{ caco3} -0/111 \text{ n} +0/006 \text{ mg} -0/021 \text{ Na}$ $+0/031 \text{ K} +12079/686 \text{ SAR} +0/024$ $\text{Spreadable clay} -0/012 \text{ PH}$	0/060	0/0341	0/656
$\theta_{10} =0/078-0/228 \text{ Sand} +0/009 \text{ Silt} +0/004$ $\text{Clay} +0/113 \text{ Bd} +0/296 \text{ dg}+ 0/042\text{Qg} +$ $0/023\text{om} -0/002 \text{ caco3} -0/051 \text{ n} + 0/002\text{ca}$ $+0/009 \text{ mg} -0/045 \text{ Na} +0/009 \text{ K} +19603/084$ SAR	0/199	0/0396	0/568
$\theta_{15} = 5/243-5/24\text{Sand} +0/075 \text{ Silt} +0/042 \text{ Clay}$ $+2/846 \text{ Bd} +5/367 \text{ dg}+0/344 \text{ Qg} +0/024 \text{ om} +$ $0/05\text{caco3} -1/897 \text{ n} -0/039 \text{ ca} -0/073 \text{ mg} -0/585$ $\text{Na} -1/467 \text{ K} + 385644/072\text{SAR} +$ $0/528\text{Spreadable clay} -0/111 \text{ PH} + 0/82\text{EC}$	0/042*	0/7116	0/684

ب: مرحله آزمون توابع انتقالی به روش رگرسیون:

به منظور ارزیابی عملکرد هریک از معادلات رگرسیونی در این مرحله نیز از مقادیر خطاهای RMSE و R استفاده شد. نتایج حاصل از آزمون توابع در جدول (۴-۷) و (۴-۸) ارائه شده است. پارامتری که مقدار خطای (RMSE) کمتری داشت به عنوان بهترین ورودی معرفی شد. بر این اساس برای ورودی‌هایی که تنها از پارامتر فیزیکی استفاده شده است، در مکش صفر تعداد ۲ پارامتره، مکش ۰/۱ تعداد ۵ پارامتره، مکش ۰/۳ تعداد ۵ پارامتره، مکش ۰/۵ تعداد ۲ پارامتره، مکش ۱ تعداد ۲ پارامتره، مکش ۳ تعداد ۴ پارامتره، مکش ۵ تعداد ۵ پارامتره، مکش ۱۰ تعداد ۵ پارامتره و مکش ۱۵ تعداد ۵ پارامتره بهترین ورودی بود. همچنین در بین ورودی‌هایی که از هر دو پارامترهای فیزیکی - شیمیایی استفاده شده است، در مکش صفر تعداد ۷ پارامتره، مکش ۰/۱ تعداد ۸ پارامتره، مکش ۰/۳ (ظرفیت زراعی) تعداد ۱۵ پارامتره، مکش ۰/۵ تعداد ۱۷ پارامتره، مکش ۱ تعداد ۹ پارامتره، مکش ۳ تعداد ۱۵ پارامتره، مکش ۵ تعداد ۱۵ پارامتره، مکش ۱۰ تعداد ۹ پارامتره و مکش ۱۵ (نقطه پژمردگی دائم) تعداد ۱۲ پارامتره بهترین ورودی بود.

جدول ۴-۷ توابع انتقالی نقطه‌ای مرحله آزمون روش رگرسیون (پارامتریک پارامترهای فیزیکی)

تابع	RMSE	R
$\theta_0 = 0/246 - 0/1 \text{ sand} + 4/544 \text{ E} - 6 \text{ silt}$	0/083	0/01
$\theta_{0/1} = 0/207 - 0/014 \text{ Sand} + 0/002 \text{ Silt} - 0/001 \text{ Clay} + 0/038 \text{ Bd} + 0/008 \text{ dg}$	0/080	0/197
$\theta_{0/3} = 0/059 + 0/031 \text{ Sand} + 0/002 \text{ Silt} - 0/001 \text{ Clay} + 0/025 \text{ Bd} - 0/045 \text{ dg}$	0/087	0/134
$\theta_{0/5} = 0/085 + 0/028 \text{ sand} + 0/003 \text{ silt}$	0/090	0/083
$\theta_1 = -0/872 + 0/036 \text{ sand} + 0/004 \text{ silt}$	0/111	0/136
$\theta_3 = -0/086 + 0/047 \text{ Sand} + 0/003 \text{ Silt} + 0/002 \text{ Clay} + 0/041 \text{ Bd}$	0/093	0/124
$\theta_5 = -0/116 + 0/057 \text{ Sand} + 0/005 \text{ Silt} + 0/005 \text{ Clay} + 0/041 \text{ Bd} + 0/101 \text{ dg}$	0/097	0/073
$\theta_{10} = 0/104 + 0/07 \text{ Sand} + 0/006 \text{ Silt} + 0/008 \text{ Clay} + 0/039 \text{ Bd} + 0/186 \text{ dg}$	0/083	0/098
$\theta_{15} = -3/094 - 0/629 \text{ Sand} + 0/041 \text{ Silt} + 0/021 \text{ Clay} + 1/408 \text{ Bd} + 0/783 \text{ dg}$	1/166	0/461

جدول ۴-۸ توابع انتقالی نقطه‌ای مرحله آزمون روش رگرسیون (پارامترهای فیزیکی و شیمیایی)

تابع	RMSE	R
$\theta_0 = -0.311 + 0/327 \text{ Sand} + 0/011 \text{ Silt} + 0/029 \text{ Clay} - 0/264 \text{ Bd} + 0/646 \text{ dg} - 0/035 \text{ Qg} + 0/007 \text{ om}$	0/0916	0/001
$\theta_{0/1} = 0/13 - 0/179 \text{ Sand} + 0/004 \text{ Silt} + 0/003 \text{ Clay} + 0/092 \text{ Bd} + 0/085 \text{ dg} + 0/025 \text{ Qg} + 0/026 \text{ om} - 0/008 \text{ caco3}$	0/0804	0/249
$\theta_{0/3} = 0/2 - 0/344 \text{ Sand} - 0/019 \text{ Clay} + 0/052 \text{ Bd} - 0/322 \text{ dg} + 0/053 \text{ Qg} + 0/025 \text{ om} - 0/004 \text{ caco3} - 0/149 \text{ n} + 0/004 \text{ ca} + 0/001 \text{ mg} - 0/018 \text{ Na} + 0/082 \text{ K} + 10009/446 \text{ SAR} + 0/031 \text{ Spreadable clay} - 0/01 \text{ PH}$	0/0828	0/353
$\theta_{0/5} = 0/186 - 0/27 \text{ Sand} + 0/003 \text{ Silt} - 0/012 \text{ Clay} + 0/044 \text{ Bd} - 0/151 \text{ dg} + 0/046 \text{ Qg} + 0/027 \text{ om} - 0/003 \text{ caco3} - 0/16 \text{ n} + 0/005 \text{ ca} + 0/003 \text{ mg} - 0/041 \text{ Na} + 0/054 \text{ K} + 11693/384 \text{ SAR} + 0/029 \text{ Spreadable clay} - 0/012 \text{ PH} - 0/002 \text{ EC}$	0/0815	0/406
$\theta_1 = -1/145 - 0/18 \text{ Sand} + 0/012 \text{ Silt} + 0/003 \text{ Clay} + 0/058 \text{ Bd} + 0/276 \text{ dg} + 0/046 \text{ Qg} + 0/046 \text{ om} + 0/007 \text{ caco3} - 0/238 \text{ n}$	0/1042	0/354
$\theta_3 = 0/13 - 0/253 \text{ Sand} + 0/002 \text{ Silt} - 0/01 \text{ Clay} + 0/064 \text{ Bd} - 0/136 \text{ dg} + 0/041 \text{ Qg} + 0/022 \text{ om} + 7/433 \text{ E} - 5 \text{ caco3} - 0/132 \text{ n} + 0/006 \text{ mg} + 0/016 \text{ Na} + 0/029 \text{ K} + 9215/058 \text{ SAR} + 0/022 \text{ Spreadable clay} - 0/01 \text{ PH}$	0/0879	0/340
$\theta_5 = -0/034 - 0/235 \text{ Sand} + 0/004 \text{ Silt} - 0/007 \text{ Clay} + 0/073 \text{ Bd} + 0/046 \text{ dg} + 0/04 \text{ Qg} + 0/022 \text{ om} - 0/001 \text{ caco3} - 0/116 \text{ n} + 0/001 \text{ ca} + 0/009 \text{ mg} - 0/023 \text{ Na} + 0/035 \text{ K} + 11553/372 \text{ SAR} + 0/023 \text{ Spreadable clay}$	0/0922	0/277
$\theta_{10} = 0/193 - 0/138 \text{ Sand} + 0/006 \text{ Silt} + 0/016 \text{ Bd} + 0/11 \text{ dg} + 0/032 \text{ om} + 0/017 \text{ caco3} - 0/002 \text{ n} - 0/155 \text{ ca}$	0/0813	0/131

$$\theta_{15} = -0/401-3/084\text{Sand} + 0/055\text{Silt} + 0/051 \text{ Clay} + \\ 1/809\text{Bd} + 3/835\text{dg}+ 0/156\text{Qg} + 0/337 \text{ om} + 0/023 \quad 1/0281 \quad 0/649 \\ \text{caco3} -2/651 \text{ n} -0/074 \text{ ca} + 0/09 \text{ mg} + 1/058 \text{ Na}$$

۴-۲-۲-۱-۲-روش شبکه عصبی مصنوعی

دومین روشی که برای اشتقاق توابع انتقالی نقطه‌ای در این پژوهش مورداستفاده قرار گرفت، استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی بود. بدین منظور یک برنامه‌ی کامپیوتری در محیط برنامه‌نویسی متلب تهیه گردید. در ابتدا داده‌های ورودی و خروجی، در هر دو مرحله‌ی آموزش و آزمون، در قالب چهار ماتریس جداگانه به شبکه فراخوانی شد. پارامترهای ورودی مورداستفاده در هر دو مرحله‌ی آموزش و آزمون شامل بافت خاک، وزن مخصوص ظاهری، وزن مخصوص حقیقی، Ph، EC، تخلخل، ماده آلی، کربنات کلسیم، سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، نسبت جذب سدیم، شاخص انبساط آزاد خاک، مقدار رس قابل پراکنش، میانگین هندسی ذرات خاک و انحراف معیار هندسی قطر ذرات بود و رطوبت حجمی خاک در مکش‌های صفر، ۰/۱، ۰/۳، ۱، ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ بار به‌عنوان پارامترهای خروجی مدل، در هر دو مرحله‌ی آموزش و آزمون در نظر گرفته شد. از آنجایی که شبکه‌های عصبی مصنوعی، جزو روش‌های تحلیل ناپارامتری هستند و بر پیش‌فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها استوار نیستند، اگر توزیع داده‌ها نرمال نباشد، تحلیل داده‌ها به روش شبکه عصبی مشکلی را به وجود نخواهد آورد (مصری، ۲۰۰۹)، لذا در این قسمت برای ماتریس داده‌های ورودی و خروجی از داده‌های اصلی استفاده شد. در ساخت یک مدل بر مبنای شبکه عصبی، اولین کار انتخاب نوع شبکه است. در این تحقیق شبکه عصبی با ساختار پرسپترون چندلایه (MLP) همراه با ناظر که از روش پس از انتشار خطا برای آموزش کمک می‌گیرد، مورداستفاده قرار گرفته است و دلیل این انتخاب توانایی این نوع شبکه‌ها برای دسته‌بندی و کلاسه‌بندی و یا یافتن نگاشته‌های نامعلوم است. در این شبکه تعداد نورون‌های لایه ورودی برابر با تعداد عناصر بردار ورودی و تعداد نورون‌های لایه‌ی خروجی برابر با تعداد عناصر بردار خروجی می‌باشد و لایه پنهان وظیفه ارتباط لایه‌های ورودی و خروجی و به‌دست آوردن روابط خطی و غیرخطی را بر عهده

دارد همچنین در یادگیری شبکه عصبی مصنوعی تعداد لایه‌های میانی و نوع توابع انتقال تأثیر مهمی بر فرایند یادگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی دارند در این تحقیق برای اجرای مدل از ساختار یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و یک لایه پنهان (لایه میانی) استفاده گردید. توابع انتقال مورد استفاده شامل purelin و logsig ، tansig ، elliotsig بود. اعداد ۱ تا ۱۹ به‌عنوان تعداد نورون لایه‌های پنهان در نظر گرفته شد. الگوریتم‌های یادگیری انواعی چون الگوریتم لونیبرگ - مارکوارت (LM)، انتشار بازگشتی (RP)، بیشترین شیب فرود (GD) و الگوریتم‌های دیگر دارد که در این تحقیق از الگوریتم لونیبرگ-مارکوارت (LM) استفاده گردید. پس از آماده شدن برنامه، در هر مکش تعداد ۱۹ پارامتر مختلف از ترکیب متغیرهای مستقل، به‌عنوان ورودی مدل شبکه عصبی مورد بررسی قرار گرفت. متغیر بودن تابع انتقال و تعداد نورون‌های لایه پنهان سبب شد تا از ترکیب این متغیرها ۷۶ جواب مختلف برای هر حالت ورودی به شبکه‌ی عصبی به دست آید. طراحی شبکه به‌گونه‌ای بود که ابتدا شبکه‌ی عصبی به‌وسیله‌ی داده‌های تخصیص‌یافته به مرحله‌ی آموزش، آموزش داده شد سپس با استفاده از وزن و بایاس‌های به‌دست‌آمده از مرحله آموزش، شبکه عصبی مورد آزمون قرار گرفت.

الف: نتایج مرحله آموزش توابع انتقالی به روش شبکه عصبی

با استفاده از مقدار خطای RMSE، بهترین جواب برای تمام ورودی‌های هر ۹ پتانسیل ماتریک بر اساس پارامترهای فیزیکی و پارامترهای فیزیکی- شیمیایی، تعیین و در جدول‌های (۴-۹) و (۴-۱۰) ثبت گردید. در این جداول به‌منظور ارزیابی عملکرد هر یک از معادلات تشکیل‌شده از R و خطای RMSE استفاده شد و بهترین پارامتر در هر مکش بر اساس کمترین مقدار خطای RMSE انتخاب شد. بر این اساس برای ورودی‌هایی که تنها از پارامتر فیزیکی استفاده شده است، در مکش صفر تعداد ۵ پارامتره، مکش ۰/۱ تعداد ۲ پارامتره، مکش ۰/۳ تعداد ۴ پارامتره، مکش ۰/۵ تعداد ۵ پارامتره، مکش ۱ تعداد ۴ پارامتره، مکش ۳ تعداد ۴ پارامتره، مکش ۵ تعداد ۶ پارامتره، مکش ۱۰ تعداد ۵ پارامتره و مکش ۱۵ تعداد ۴ پارامتره بهترین ورودی بود. همچنین در بین ورودی‌هایی که از هر دو پارامترهای فیزیکی- شیمیایی استفاده شده است، در مکش صفر تعداد ۱۰ پارامتره، مکش ۰/۱ تعداد ۱۷ پارامتره، مکش ۰/۳

تعداد ۱۰ پارامتره، مکش ۰/۵ تعداد ۷ پارامتره، مکش ۱ تعداد ۱۱ پارامتره، مکش ۳ تعداد ۱۵ پارامتره، مکش ۵ تعداد ۱۷ پارامتره، مکش ۱۰ تعداد ۱۰ پارامتره و مکش ۱۵ تعداد ۱۷ پارامتره بهترین عملکرد را داشتند.

جدول ۴-۹ توابع انتقالی نقطه‌ای مرحله آموزش روش شبکه عصبی مصنوعی (پارامترهای فیزیکی)

مکش	پارامترهای ورودی مدل	تعداد نورون لایه پنهان	تابع انتقال	RMSE	R
۰	Psd, bd, dg	۱۴	logsig	۰/۰۲۵	۰/۹۰
۰/۱	Sand, silt	۵	logsig	۰/۰۳۵	۰/۷۰
۰/۳	Psd, bd	۳	logsig	۰/۰۳۰	۰/۷۳
۰/۵	Psd, bd, dg	۱۵	elliotsig	۰/۰۲۵	۰/۸۱
۱	Psd, bd	۱۹	logsig	۰/۰۲۲	۰/۸۶
۳	Psd, bd	۷	tansig	۰/۰۱۸	۰/۸۹
۵	Psd, bd, dg, Qg	۱۶	logsig	۰/۰۲۰	۰/۸۸
۱۰	Psd, bd, dg	۱۴	logsig	۰/۰۲۳	۰/۸۴
۱۵	Psd, bd	۱۷	elliotsig	۰/۰۲۲	۰/۸۸

جدول ۴-۱۰ توابع انتقالی نقطه‌ای مرحله آموزش روش شبکه عصبی مصنوعی پارامترهای فیزیکی-شیمیایی

مکش	پارامترهای ورودی مدل	تعداد نورون لایه پنهان	تابع انتقال	RMSE	R
۰	Psd, bd, dg, Qg, om, caco3, n, ca	۸	tansig	۰/۰۲۵	۰/۹۱
۰/۱	Psd, bd, dg, Qg, om, caco3, n, ca, mg, na, k, sar, Spreadable clay, ph, Ec	۱۷	logsig	۰/۰۲۸	۰/۸۲
۰/۳	Psd, bd, dg, Qg, om, caco3, n, ca	۱۷	tansig	۰/۰۲۳	۰/۸۵
۰/۵	Psd, bd, dg, Qg, om	۱۹	tansig	۰/۰۲۱	۰/۸۸
۱	Psd, bd, dg, Qg, om, caco3, n, ca, mg	۹	logsig	۰/۰۱۸	۰/۹۰
۳	Psd, bd, dg, Qg, om, caco3, n, ca, mg, na, k, sar, rosgh	۱۸	tansig	۰/۰۱۹	۰/۸۸

۵	Psd, bd, dg, Qg, om, caco3 , n, ca, mg, na, k, sar, Spreadable clay, ph, Ec	۱۲	tansig	۰/۰۱۹	۰/۸۹
۱۰	Psd, bd, dg, Qg, om, caco3 ,n,ca	۱۴	elliotsig	۰/۰۲۳	۰/۸۳
۱۵	Psd,bd,dg,Qg,om,caco3 ,n,ca,mg,na,k,sar,Spreadable clay,ph,Ec	۷	logsig	۰/۰۲۸	۰/۸۰

ب: نتایج مرحله آزمون توابع انتقالی به روش شبکه عصبی

با استفاده از مقدار خطای RMSE، بهترین جواب برای تمام ورودی‌های هر ۹ پتانسیل ماتریک بر اساس پارامترهای فیزیکی و پارامترهای فیزیکی - شیمیایی، تعیین و در جدول‌های (۴-۱۱) و (۴-۱۲) ثبت گردید. در این جداول به منظور ارزیابی عملکرد هر یک از معادلات تشکیل شده از R و خطای RMSE استفاده شد. بر این اساس برای ورودی‌هایی که تنها از پارامتر فیزیکی استفاده شده است، در مکش صفر تعداد ۴ پارامتره، مکش ۰/۱ تعداد ۳ پارامتره، مکش ۰/۳ تعداد ۵ پارامتره، مکش ۰/۵ تعداد ۶ پارامتره، مکش ۱ تعداد ۵ پارامتره، مکش ۳ تعداد ۴ پارامتره، مکش ۵ تعداد ۵ پارامتره، مکش ۱۰ تعداد ۳ پارامتره و مکش ۱۵ تعداد ۶ پارامتره بهترین عملکرد را دارد. همچنین در بین ورودی‌هایی که از هر دو پارامترهای فیزیکی - شیمیایی استفاده شده است، در مکش صفر تعداد ۱۳ پارامتره، مکش ۰/۱ تعداد ۱۶ پارامتره، مکش ۰/۳ تعداد ۱۷ پارامتره، مکش ۰/۵ تعداد ۱۶ پارامتره، مکش ۱ تعداد ۷ پارامتره، مکش ۳ تعداد ۱۳ پارامتره، مکش ۵ تعداد ۱۷ پارامتره، مکش ۱۰ تعداد ۱۳ پارامتره و مکش ۱۵ تعداد ۱۷ پارامتره بهترین عملکرد را داشتند. مردون و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از روش شبکه عصبی رطوبت اشباع را با استفاده از پارامترهای ورودی شامل رس، شن، سیلت، جرم مخصوص ظاهری با اندازه‌های مختلف برآورد کردند و R^2 برابر ۰/۹ را به دست آوردند. شیرانی و رفیع نژاد (۱۳۹۰) از شبکه عصبی برای تخمین رطوبت ظرفیت زراعی استفاده کردند و بیان کردند بهترین نتیجه زمانی به دست می‌آید که از همه پارامترهای ورودی شامل شن، سیلت، رس، ماده آلی، گچ، کربنات کلسیم و جرم مخصوص ظاهری در یک مدل برای تخمین رطوبت ظرفیت زراعی استفاده شود.

جدول ۴-۱۱ توابع انتقالی نقطه‌ای مرحله آزمون روش شبکه عصبی مصنوعی (پارامترهای فیزیکی)

مکش	پارامترهای ورودی مدل	تعداد نورون لایه پنهان	تابع انتقال	RMSE	R
۰	Psd, bd	۱۷	elliotsig	۰/۰۶۳	۰/۷۵
۰/۱	Sand, silt+clay	۱۴	elliotsig	۰/۰۷۸	۰/۲۸
۰/۳	Psd, bd, dg	۱۱	elliotsig	۰/۰۷۶	۰/۵۰
۰/۵	Psd, bd, dg, Qg	۱۹	elliotsig	۰/۰۷۶	۰/۱۷
۱	Psd, bd, dg	۱۷	tansig	۰/۰۷۰	۰/۶۴
۳	Psd, bd	۴	elliotsig	۰/۰۸۳	۰/۵۰
۵	Psd, bd, dg	۱۸	tansig	۰/۰۸۲	۰/۵۳
۱۰	Sand, silt, clay	۱۲	logsig	۰/۰۶۶	۰/۷۱
۱۵	Psd, bd, dg, Qg	۱۷	elliotsig	۰/۰۸۶	۰/۶۹

جدول ۴-۱۲ توابع انتقالی نقطه‌ای مرحله آزمون روش شبکه عصبی مصنوعی (پارامترهای فیزیکی - شیمیایی)

مکش	پارامترهای ورودی مدل	تعداد نورون لایه پنهان	تابع انتقال	RMSE	R
0	Psd, bd, dg, Qg, om, caco3, n, ca, mg, na, k	۱۹	tansig	۰/۰۵۶	۰/۷۵
۰/۱	Psd, bd, dg, Qg, om, caco3, n, ca, mg, na, k, sar, Spreadable clay, ph	۱۲	elliotsig	۰/۰۶۳	۰/۷۶
۰/۳	Psd, bd, dg, Qg, om, caco3, n, ca, mg, na, k, sar, Spreadable clay, ph, Ec	۳	elliotsig	۰/۰۶۱	۰/۷۷
۰/۵	Psd, bd, dg, Qg, om, caco3, n, ca, mg, na, k, sar, Spreadable clay, ph	۱	elliotsig	۰/۰۵۹	۰/۸۴
۱	Psd, bd, dg, Qg, om	۲	elliotsig	۰/۰۵۳	۰/۸۶
۳	Psd+bd+dg+Qg+om+caco3, n, ca, mg, na, k	۱۹	tansig	۰/۰۶۵	۰/۷۶
۵	Psd, bd, dg, Qg, om, caco3, n, ca, mg, na, k, sar, Spreadable clay, ph, Ec	۱۶	elliotsig	۰/۰۵۸	۰/۷۹

۱۰	Psd, bd, dg, Qg, om, caco3, n, ca, mg, na, k	۱۱	elliotsig	۰/۰۷۳	۰/۸۳
۱۵	Psd, bd, dg, Qg, om, caco3, n, ca, mg, na, k, sar, Spreadable clay, ph, Ec	۱۲	elliotsig	۰/۰۶۷	۰/۷۷

۳-۱-۲-۲-۴- مقایسه نتایج روش رگرسیونی و شبکه عصبی

نمودار خط یک‌به‌یک مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده رطوبت اشباع، ظرفیت زراعی، رطوبت در مکش ۳، ۵، ۱۰ و رطوبت پژمردگی دائم، ۰/۱، ۰/۵ و یک‌بار با استفاده از توابع انتقالی رگرسیونی و شبکه عصبی در شکل‌های (۹-۴) و (۱۲-۴) نشان داده شده است. برای ورودی‌هایی که تنها از پارامترهای فیزیکی استفاده شده است، کمترین مقدار خطای RMSE برای تخمین رطوبت اشباع، ظرفیت زراعی، رطوبت در مکش ۳، ۵، ۱۰ و رطوبت پژمردگی دائم، ۰/۱، ۰/۵ و یک اتمسفر با استفاده از توابع انتقالی رگرسیونی برای داده‌های آموزش و آزمون به ترتیب برابر با (۰/۰۴۰، ۰/۰۴۲۲، ۰/۰۳۶۴، ۰/۰۳۹۵، ۰/۰۴۱۷، ۰/۰۸۶۶، ۰/۰۴۶۳، ۰/۰۳۹۵، ۰/۰۶۰۵) و (۰/۰۸۷، ۰/۰۸۳۸، ۰/۰۹۳، ۰/۰۹۷۴، ۰/۰۸۳۶، ۰/۰۱۶۶، ۰/۰۸۰۱، ۰/۰۹۰۲، ۰/۱۱۱۶) و برای شبکه عصبی مصنوعی به ترتیب برابر با (۰/۰۲۵۸، ۰/۰۳۰۹، ۰/۰۱۸۹، ۰/۰۲۰۶، ۰/۰۲۳۷، ۰/۰۲۲۰، ۰/۰۳۵۷، ۰/۰۲۵۶، ۰/۰۲۲۴) و (۰/۰۶۳۱، ۰/۰۷۶۹، ۰/۰۸۳۳، ۰/۰۸۲۹، ۰/۰۶۶۳، ۰/۰۸۶۵، ۰/۰۷۸۶، ۰/۰۷۶۹، ۰/۰۷۰۷) به دست آمد. همچنین در بین ورودی‌هایی که از هر دو پارامتر فیزیکی - شیمیایی استفاده شده است کمترین مقدار خطای RMSE برای تخمین رطوبت اشباع، ظرفیت زراعی، رطوبت در مکش ۳، ۵، ۱۰ و رطوبت پژمردگی دائم، ۰/۱، ۰/۵ و یک‌بار با استفاده از توابع انتقالی رگرسیونی برای داده‌های آموزش و آزمون به ترتیب برابر با (۰/۰۳۶۱، ۰/۰۳۳۸، ۰/۰۳۲۱، ۰/۰۳۴۱، ۰/۰۳۹۶، ۰/۰۷۱۱، ۰/۰۳۶۸، ۰/۰۳۰۸، ۰/۰۵۱۸) و (۰/۰۹۱۶، ۰/۰۸۲۸، ۰/۰۸۷۹، ۰/۰۹۲۲، ۰/۰۸۱۳، ۰/۰۲۸، ۰/۰۸۰۴، ۰/۰۸۱۵، ۰/۱۰۴۲) و برای شبکه عصبی مصنوعی به ترتیب برابر با (۰/۰۲۵۴، ۰/۰۲۳۵، ۰/۰۱۹۸، ۰/۰۱۹۸، ۰/۰۲۳۸، ۰/۰۲۸۱، ۰/۰۲۸۶، ۰/۰۲۱۷، ۰/۰۱۸۸) و (۰/۰۵۶۶، ۰/۰۶۱۱، ۰/۰۶۵۹، ۰/۰۵۸۸، ۰/۰۷۳۳، ۰/۰۶۷۵، ۰/۰۶۳۴، ۰/۰۵۹۲، ۰/۰۵۳۸) به دست آمد. مقایسه نتایج نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی دقت بالاتر و خطای کمتری

نسبت به توابع انتقالی رگرسیونی در تخمین مقدار رطوبت دارد. نتایج به دست آمده با نتایج پاچپسکی و همکاران (۱۹۹۶) با مقدار خطای RMSE بین ۰/۰۱۳ تا ۰/۰۲۵ و سرمدیان و همکاران (۱۳۸۹) با مقدار خطای $RMSE = 0/045$ مطابقت دارد. مقدار متوسط خطای RMSE مرحله آموزش و آزمون نشان داد که خطای توابع انتقالی رگرسیون و شبکه عصبی در مکش‌های پایین θ_s و $\theta_{.3}$ که تابعی از ساختمان خاک‌اند نسبت به مکش بالا $\theta_{.15}$ که بیشتر تابع بافت خاک است به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر است.

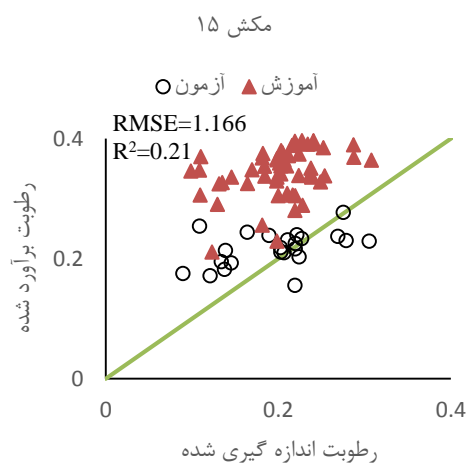
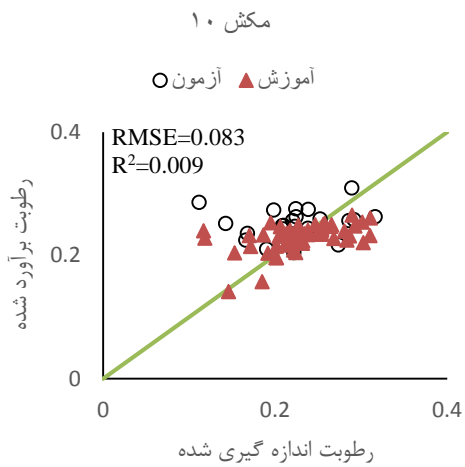
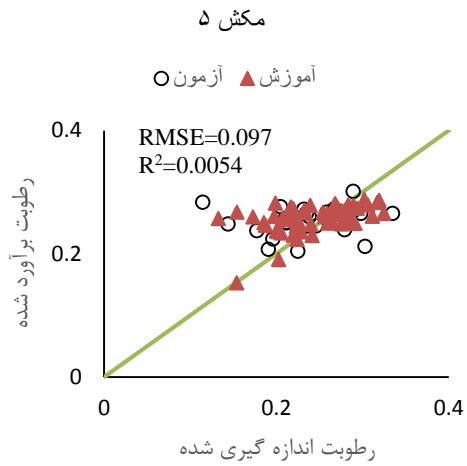
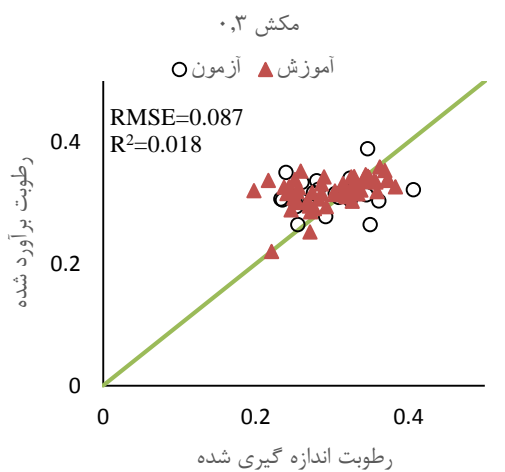
با توجه به شکل ۴-۹ داده‌های روش رگرسیونی با پارامترهای فیزیکی در مکش‌های صفر، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و یک تقریباً روی خط یک به یک قرار گرفته است. این موضوع نشان دهنده این است که مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده تقریباً برابر است. همچنین در شکل ۴-۱۰ داده‌های روش رگرسیونی با پارامترهای فیزیکی و شیمیایی در مکش‌های ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۵ پایین خط یک به یک قرار گرفته است و این موضوع نشان دهنده این است که مقادیر پیش‌بینی شده کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده است، همچنین در مکش‌های ۳، ۱۰ و ۱۵ داده‌ها تقریباً روی خط یک به یک قرار گرفته است و این موضوع نشان دهنده این است که مقادیر پیش‌بینی شده تقریباً با مقادیر اندازه‌گیری شده برابر است.

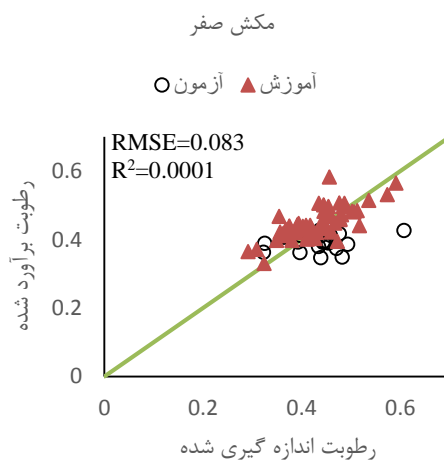
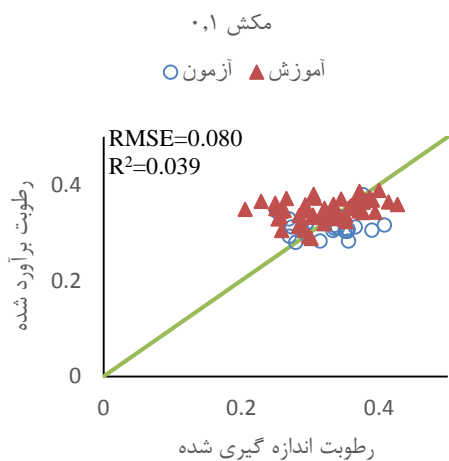
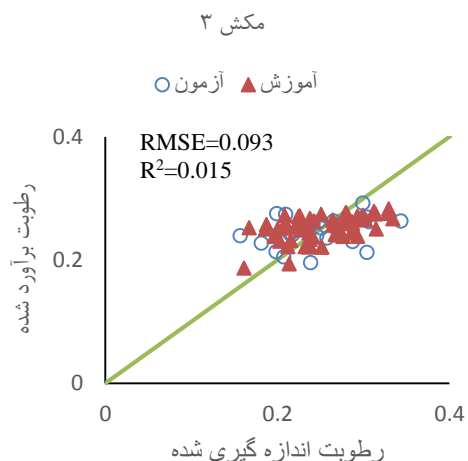
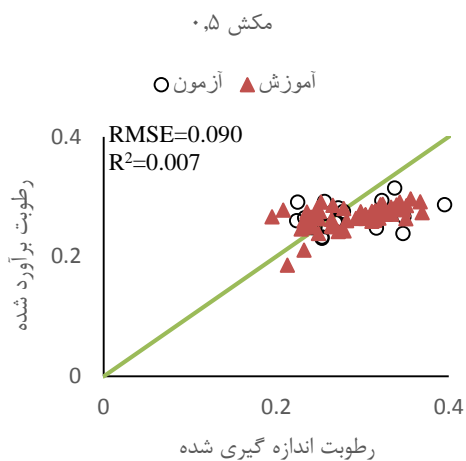
با توجه به شکل ۴-۱۱ داده‌های مدل شبکه عصبی با پارامترهای فیزیکی و شیمیایی در مکش صفر، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۱، ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ تقریباً روی خط یک به یک قرار گرفته است. این موضوع نشان دهنده این است که مقادیر پیش‌بینی با مقادیر اندازه‌گیری شده تقریباً برابر است.

با توجه به شکل ۴-۱۲ داده‌های مدل شبکه عصبی با پارامترهای فیزیکی در مکش‌های صفر، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۱، ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ تقریباً نزدیک به خط یک به یک قرار گرفته است این موضوع نیز نشان دهنده این است که مقادیر رطوبت پیش‌بینی شده با مقادیر رطوبت اندازه‌گیری تقریباً برابر است.

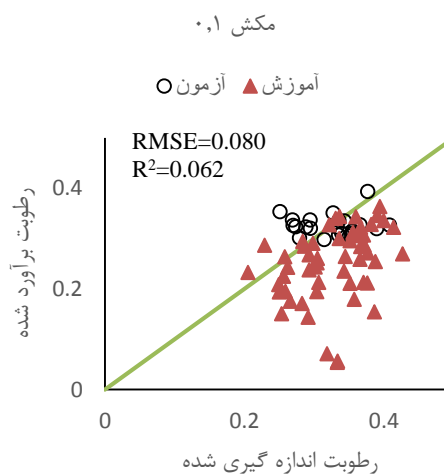
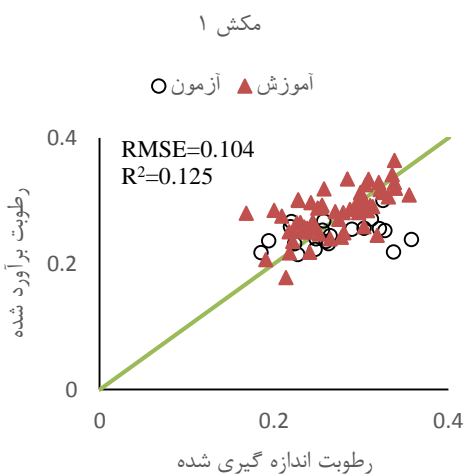
امری عابدی و همکاران (۱۳۹۲) روش‌های رگرسیونی و شبکه عصبی را به منظور برآورد رطوبت‌های ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم و آب قابل استفاده مورد ارزیابی قرار دادند نتایج نشان داد شبکه

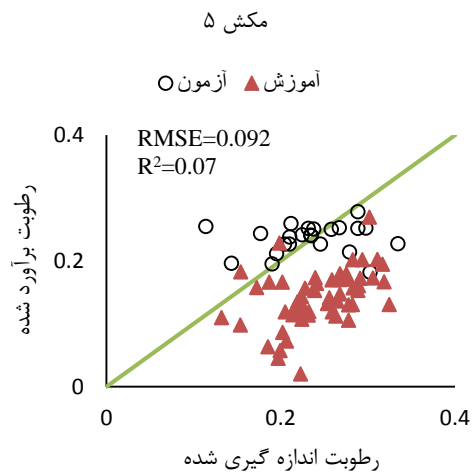
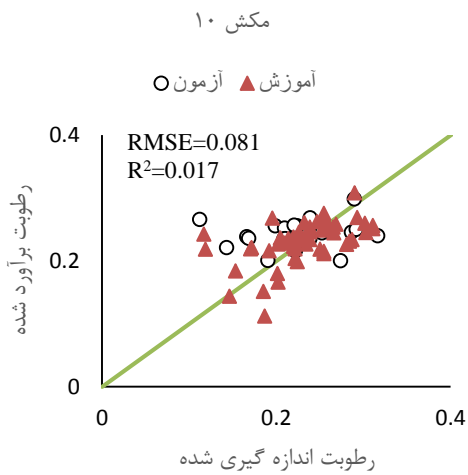
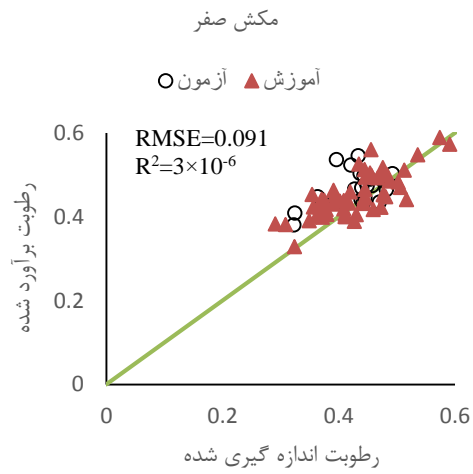
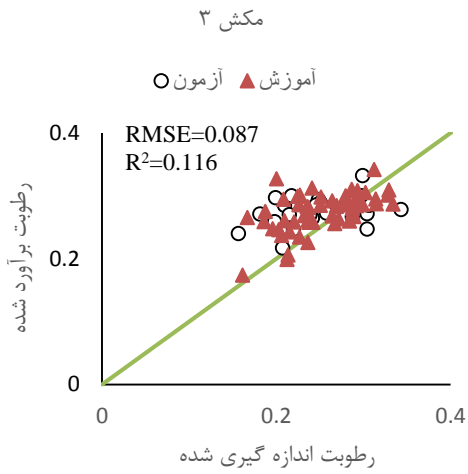
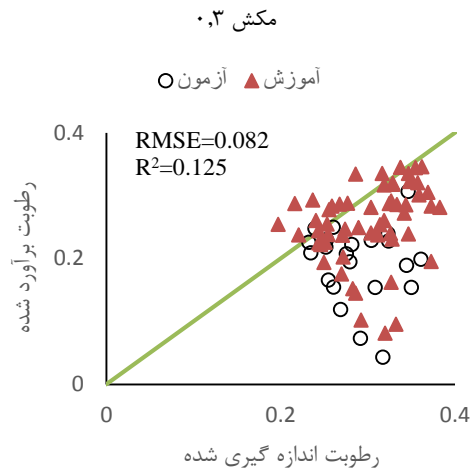
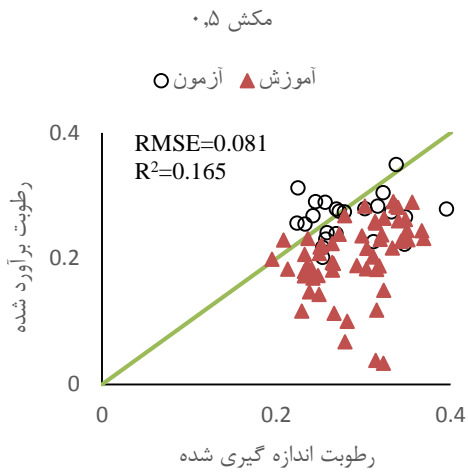
عصبی مصنوعی به علت داشتن R^2 بالا و RMSE پایین تر دارای دقت بالاتر و خطای کمتر در تخمین ضرائب رطوبتی خاک نسبت به توابع انتقالی رگرسیونی بودند. نتایج تحقیق حاضر با نتایج امیر عابدی و همکاران (۱۳۹۲) مطابقت دارد.

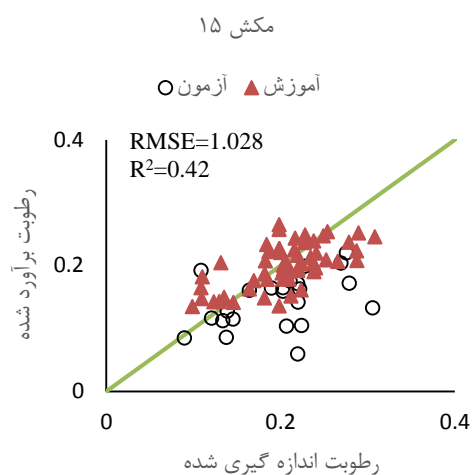




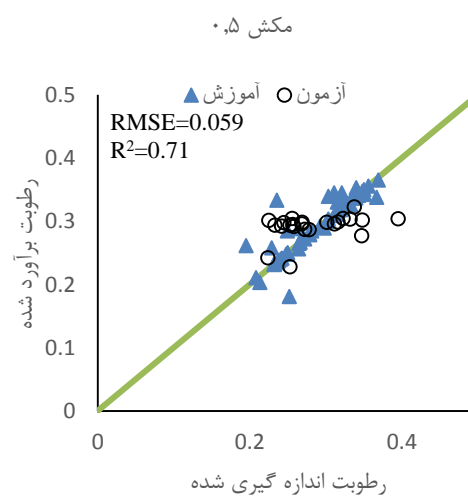
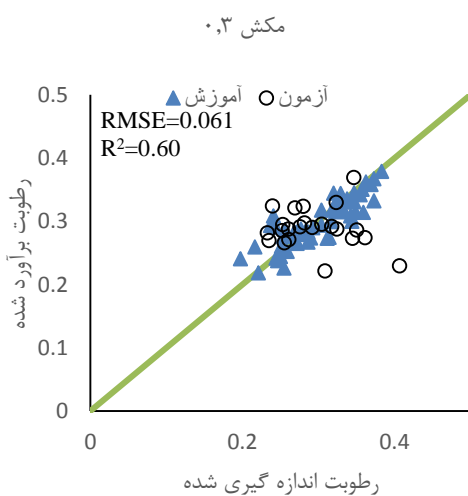
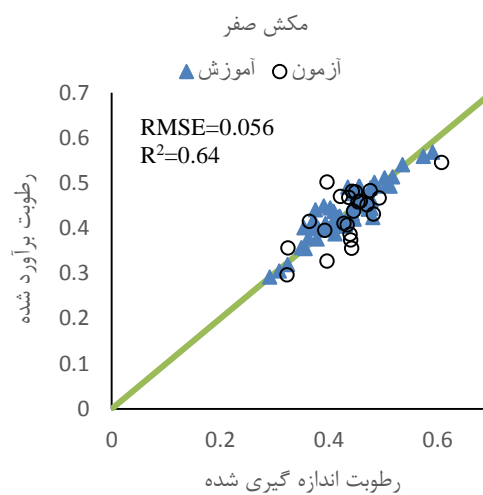
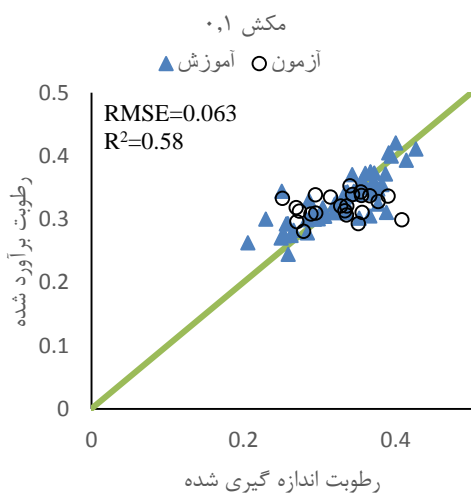
شکل ۴-۹ مقادیر رطوبت اندازه گیری شده و برآورد شده پارامترهای فیزیکی با استفاده از بهترین مدل رگرسیون نسبت به خط ۱:۱

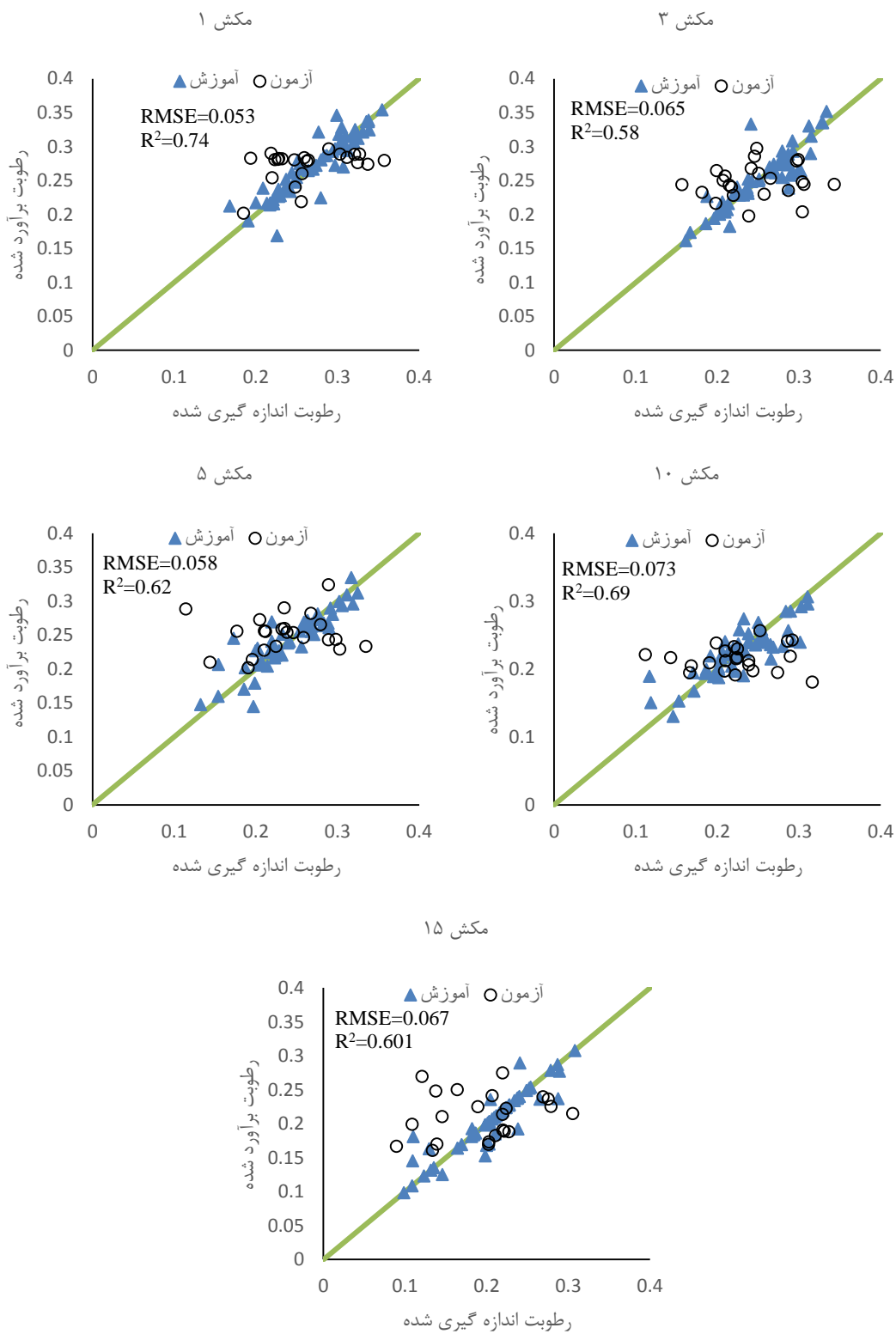




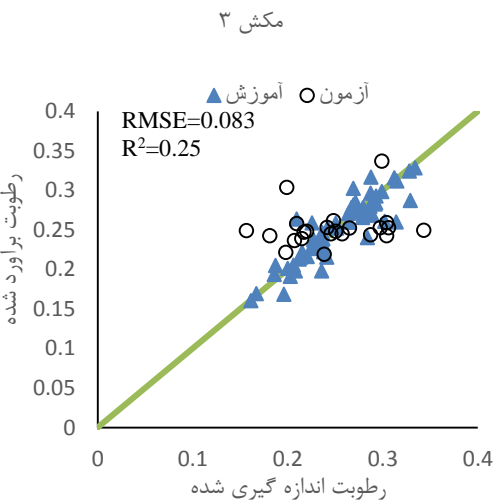
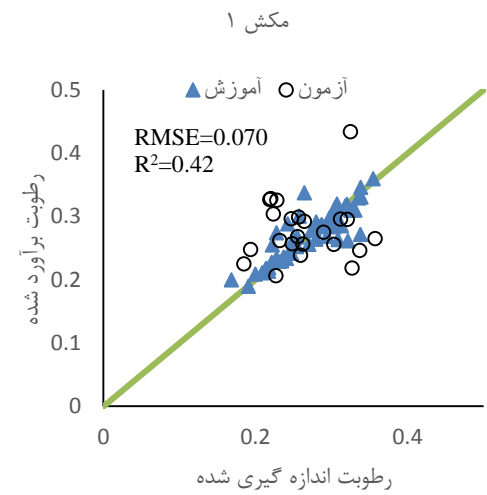
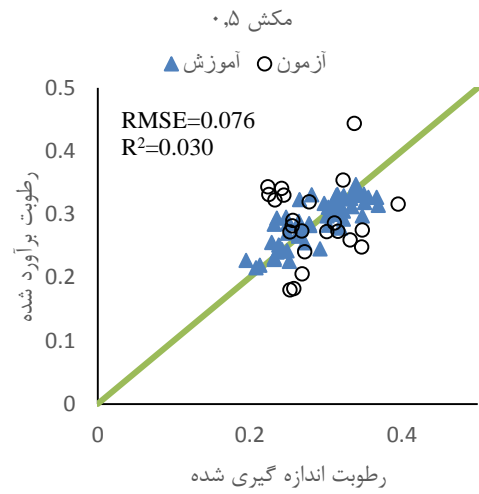
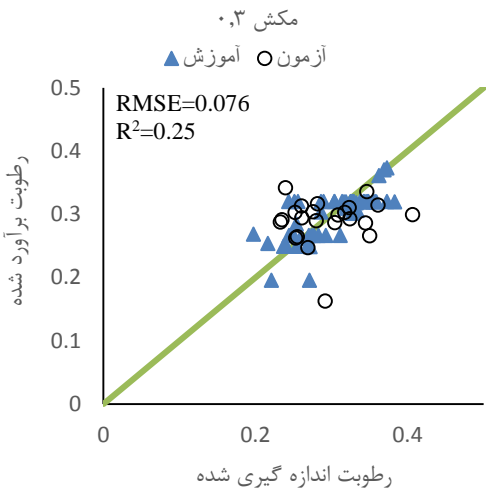
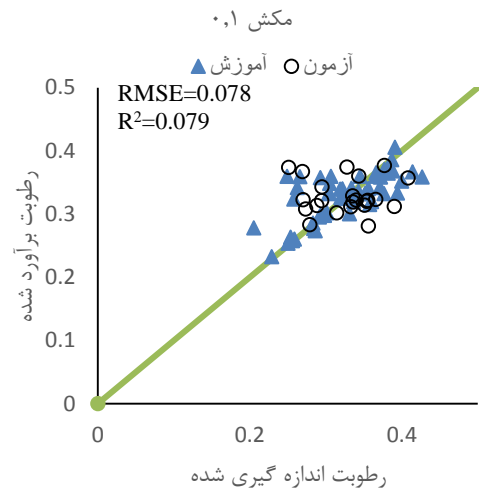
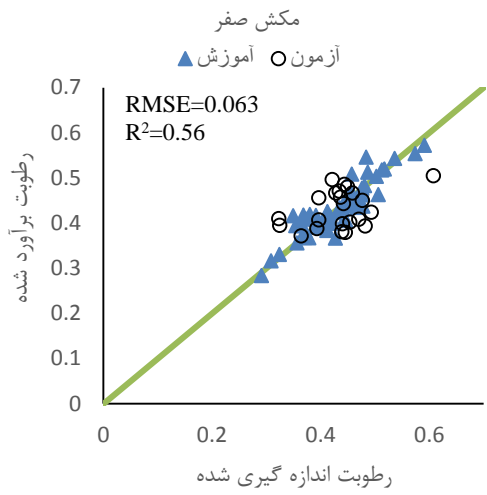


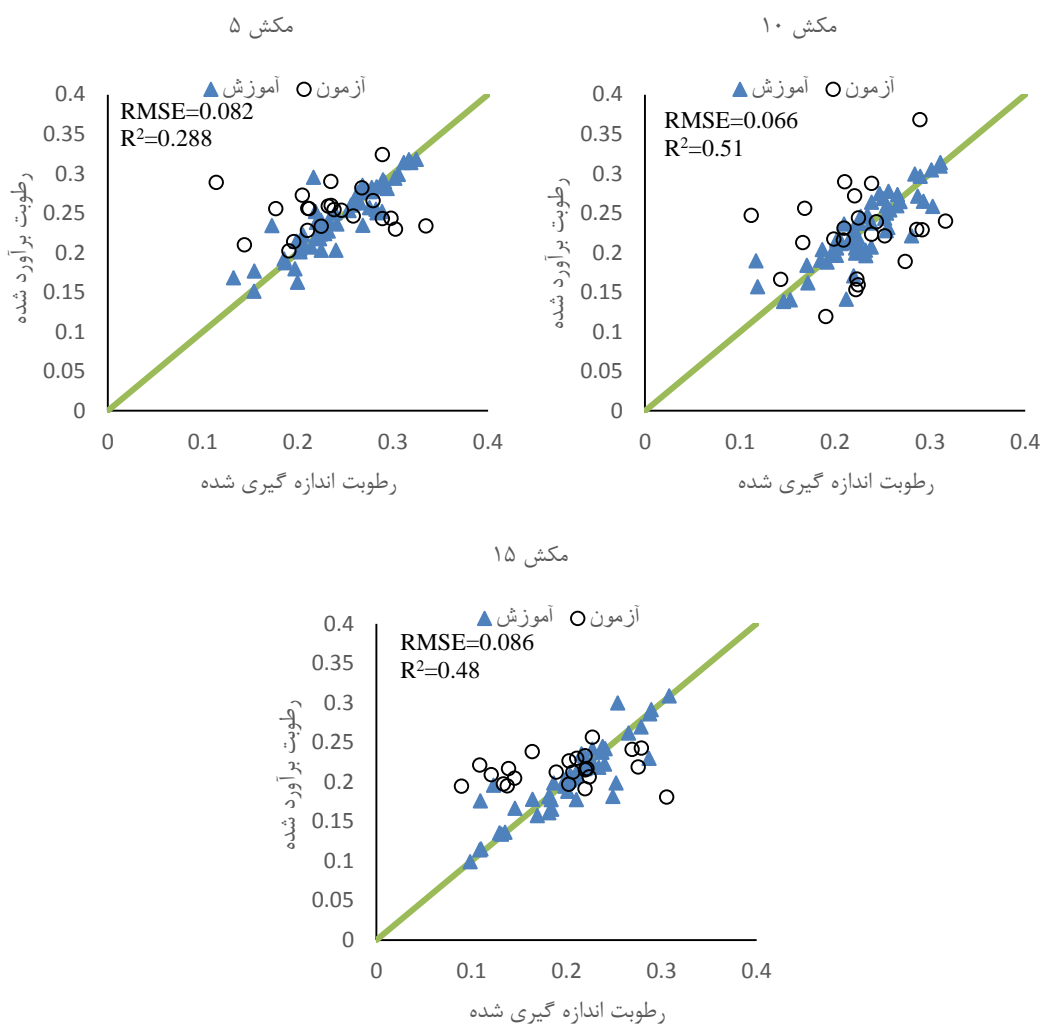
شکل ۴-۱۰ مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و برآورد شده پارامترهای فیزیکی-شیمیایی با استفاده از بهترین مدل رگرسیون نسبت به خط ۱:۱





شکل ۴-۱۱ مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و برآورد شده پارامترهای فیزیکی-شیمیایی با استفاده از بهترین مدل شبکه عصبی نسبت به خط ۱:۱





شکل ۴-۱۲ مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و برآورد شده پارامترهای فیزیکی با استفاده از بهترین مدل شبکه عصبی نسبت به خط ۱:۱

۴-۲-۳ توسعه تابع انتقالی پارامتریک (معادله ون گنوختن)

برای توسعه‌ی معادله ون گنوختن همانند قسمت توابع انتقالی نقطه‌ای (بخش ۴-۸)، از هر دو روش رگرسیون خطی چندگانه و شبکه‌ی عصبی استفاده شد. تقسیم‌بندی داده‌ها به دو گروه آموزش و آزمون مشابه با قسمت توابع انتقالی نقطه‌ای بود. در این بخش ابتدا توابع تشکیل‌شده توسط رگرسیون خطی چندگانه و شبکه‌ی عصبی به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفت و در انتها از مقایسه‌ی نتایج این دو قسمت، روش بهینه معرفی گردید.

۴-۲-۳-۱ - روش رگرسیونی

در روش اول با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه، رابطه‌ی بین هر ۵ پارامتر معادله‌ی ون گنوختن با پارامترهای فیزیکی و فیزیکی-شیمیایی خاک برای هر دو گروه از داده‌های آموزشی و آزمون تعیین شد. برای این منظور پس از نرمال‌سازی داده‌ها، رابطه‌ی خطی برای هر ۱۷ پارامتر مورد مطالعه در بخش توابع انتقالی نقطه‌ای به دست آمد. همچنین با محاسبه‌ی مقدار خطای RMSE و ضریب تعیین R^2 ، بهترین جواب برای هر پنج پارامتر مشخص گردید. در جدول‌های (۴-۱۳) و (۴-۱۶)، بهترین ورودی پارامترهای معادله‌ی ون گنوختن از بین ترکیبات متعدد پارامترهای فیزیکی و فیزیکی-شیمیایی در مرحله‌ی آموزش مشخص شده است. همچنین بهترین ورودی پارامترهای معادله‌ی ون گنوختن از بین ترکیبات متعدد پارامترهای فیزیکی و فیزیکی-شیمیایی در مرحله‌ی آزمون در جدول‌های (۴-۱۳) تا (۴-۱۶) آمده است. نتایج نشان داد که مدل رگرسیون چندگانه خطی توانسته از بین پارامترهای معادله ون گنوختن پارامتر m را در مرحله آموزش پارامترهای فیزیکی و فیزیکی-شیمیایی بر اساس کمترین مقدار خطای RMSE به خوبی پیش‌بینی کند. همچنین مدل رگرسیون پیش‌بینی خوبی از مقدار پارامتر θ_r داشته است. از طرفی مدل رگرسیون توانسته از بین پارامترهای معادله ون گنوختن پارامتر θ_r و m را در مرحله آزمون پارامترهای فیزیکی و فیزیکی-شیمیایی بر اساس کمترین مقدار خطای RMSE پیش‌بینی کند.

جدول ۴-۱۳ پارامترهای فیزیکی مرحله آموزش

پارامتر	تعداد پارامتر ورودی	RMSE(m ³ /m ³)	R ²
θ_r	۶	۰/۱۳۱	۰/۱۰۱
θ_s	۶	۰/۵۷۵	۰/۵۸
α	۶	۱۴۷/۱۳۱	۰/۱۸۵
n	۶	۰/۶۹۰	۰/۳۲
m	۶	۰/۰۸۹	۰/۳۳

جدول ۴-۱۴ پارامترهای فیزیکی - شیمیایی مرحله آموزش

پارامتر	تعداد پارامتر ورودی	RMSE(m ³ /m ³)	R ²
θ_r	۱۷	۰/۱۱۲	۰/۷۲
θ_s	۱۷	۰/۴۷۰	۰/۳۶
α	۱۶	۱۲۷/۷۲	۰/۰۰۱
n	۹	۰/۲۰۶	۰/۳۵
m	۱۷	۰/۰۷۶	۰/۵۱

جدول ۴-۱۵ پارامترهای فیزیکی مرحله آزمون

پارامتر	تعداد پارامتر ورودی	RMSE(m ³ /m ³)	R ²
θ_r	۱	۰/۱۳۵	۰/۰۰۲
θ_s	۲	۱/۰۱	۰/۰۰۷
α	۱	۱۱۳۶/۳۴	۰/۰۵۶
n	۶	۱/۰۰۴۵	۰/۱۳۲
m	۲	۰/۱۴۹	۰/۰۷۲

جدول ۴-۱۶ پارامترهای فیزیکی - شیمیایی مرحله آزمون

پارامتر	تعداد پارامتر ورودی	RMSE(m ³ /m ³)	R ²
θ_r	۷	۰/۱۴۴	۰/۰۰۰۲
θ_s	۷	۱/۱۶۱	۰/۰۰۷
α	۷	۰۱۱۶۱/۹۴	۰/۲۴
n	۱۰	۰/۹۰۱	۰/۲۹
m	۱۰	۰/۱۳۵	۰/۲۴

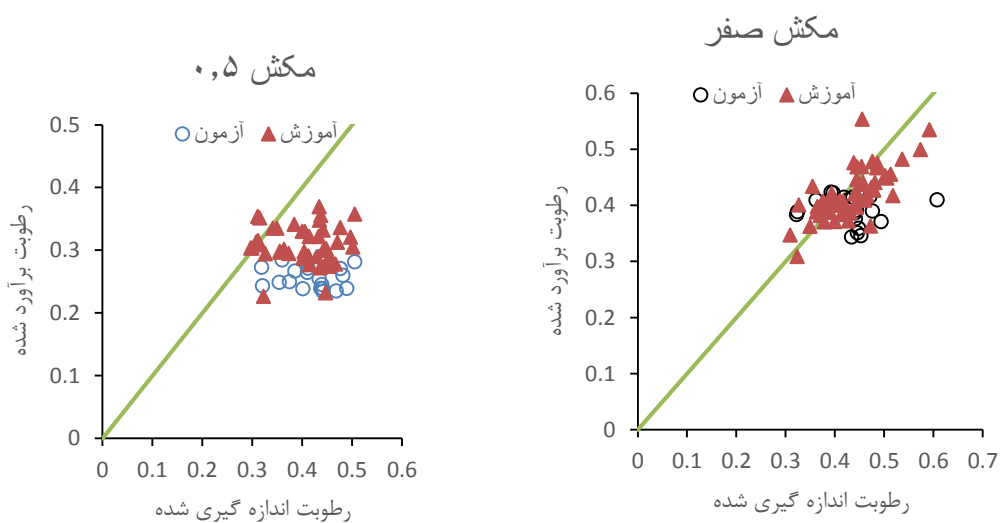
با جایگذاری بهترین تعداد پارامتر ورودی از پارامترهای برآورد شده توسط رگرسیون خطی در معادله ون گنوختن مقدار رطوبت محاسبه شد.

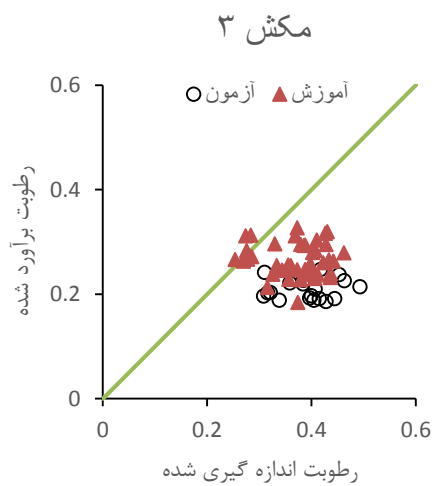
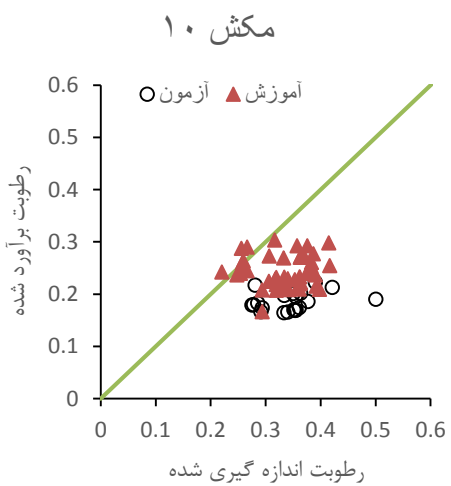
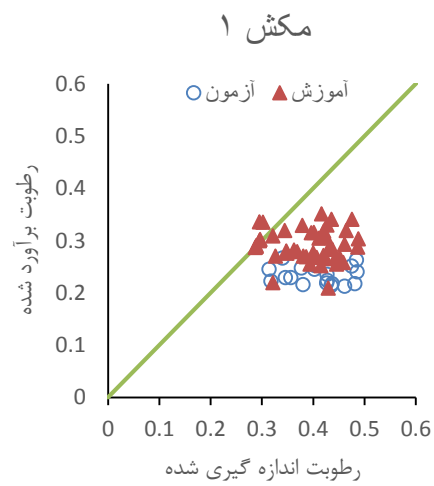
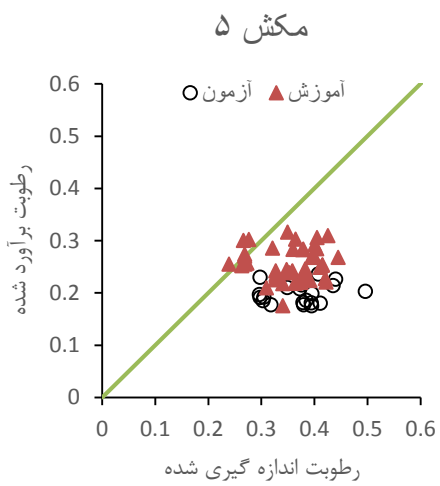
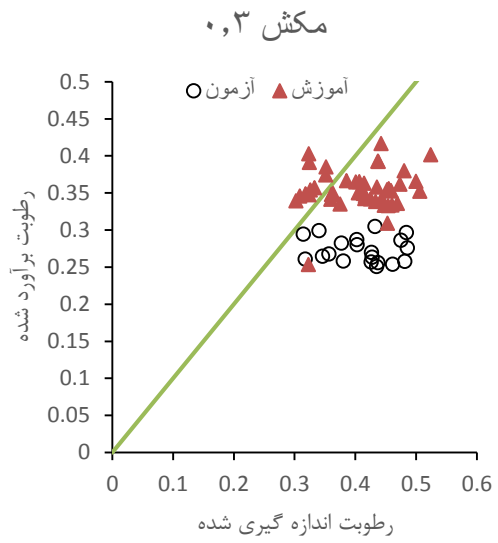
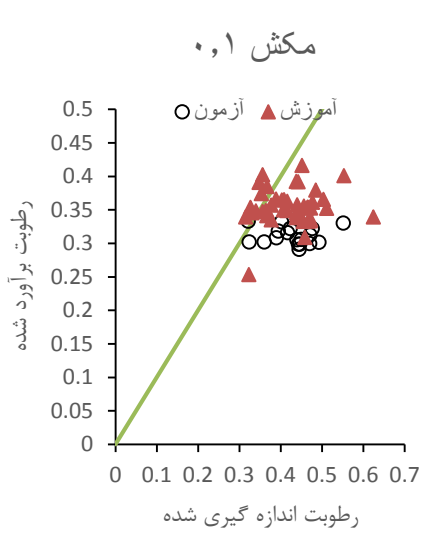
شکل (۴-۱۳) نمودار خط یک به یک رطوبت اندازه گیری شده در مقابل رطوبت برآورد شده را برای ورودی هایی که تنها از پارامترهای فیزیکی استفاده شده است در هر دو مرحله آموزش و آزمون نشان داده است. همچنین نمودار خط یک به یک رطوبت اندازه گیری شده در مقابل رطوبت برآورد شده برای ورودی هایی که از پارامترهای فیزیکی-شیمیایی استفاده شده است در هر دو مرحله آموزش و آزمون در شکل (۴-۱۴) نمایش داده شده است. با توجه به اینکه در شکل های (۴-۱۳) و (۴-۱۴) نمودارهای

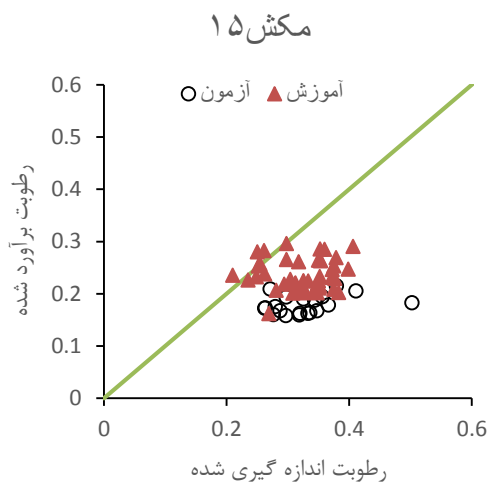
رطوبت از نمودار خط یک‌به‌یک پیروی نمی‌کند، رگرسیون خطی در هیچ‌یک از ورودی‌های فیزیکی و فیزیکی-شیمیایی چه در مرحله‌ی آموزش و چه در مرحله‌ی آزمون توانایی پیش‌بینی درست از پارامترهای معادله‌ی ون‌گنوختن را ندارد.

با توجه به شکل ۴-۱۳ روش رگرسیونی با پارامترهای فیزیکی در مکش‌های صفر، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۱، ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ پایین خط یک به یک قرار گرفته است که این موضوع نشان دهنده این است که مقادیر رطوبت پیش‌بینی شده کمتر از مقادیر اندازه‌گیری برآورد شده است.

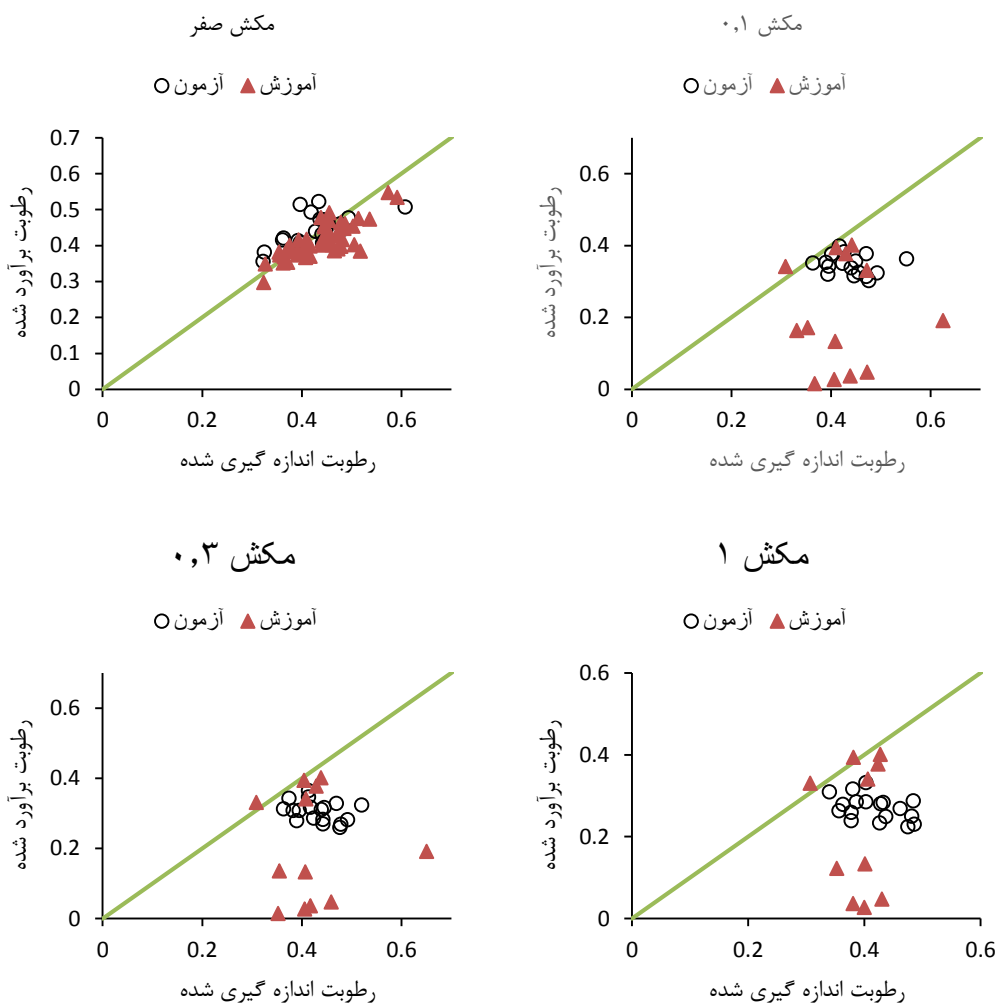
همچنین در شکل ۴-۱۴ روش رگرسیونی با پارامترهای فیزیکی و شیمیایی در مکش‌های صفر، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۱، ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ داده‌ها زیر خط یک به یک قرار گرفته است و این موضوع نشان دهنده این است که مقادیر رطوبت پیش‌بینی شده کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده است.

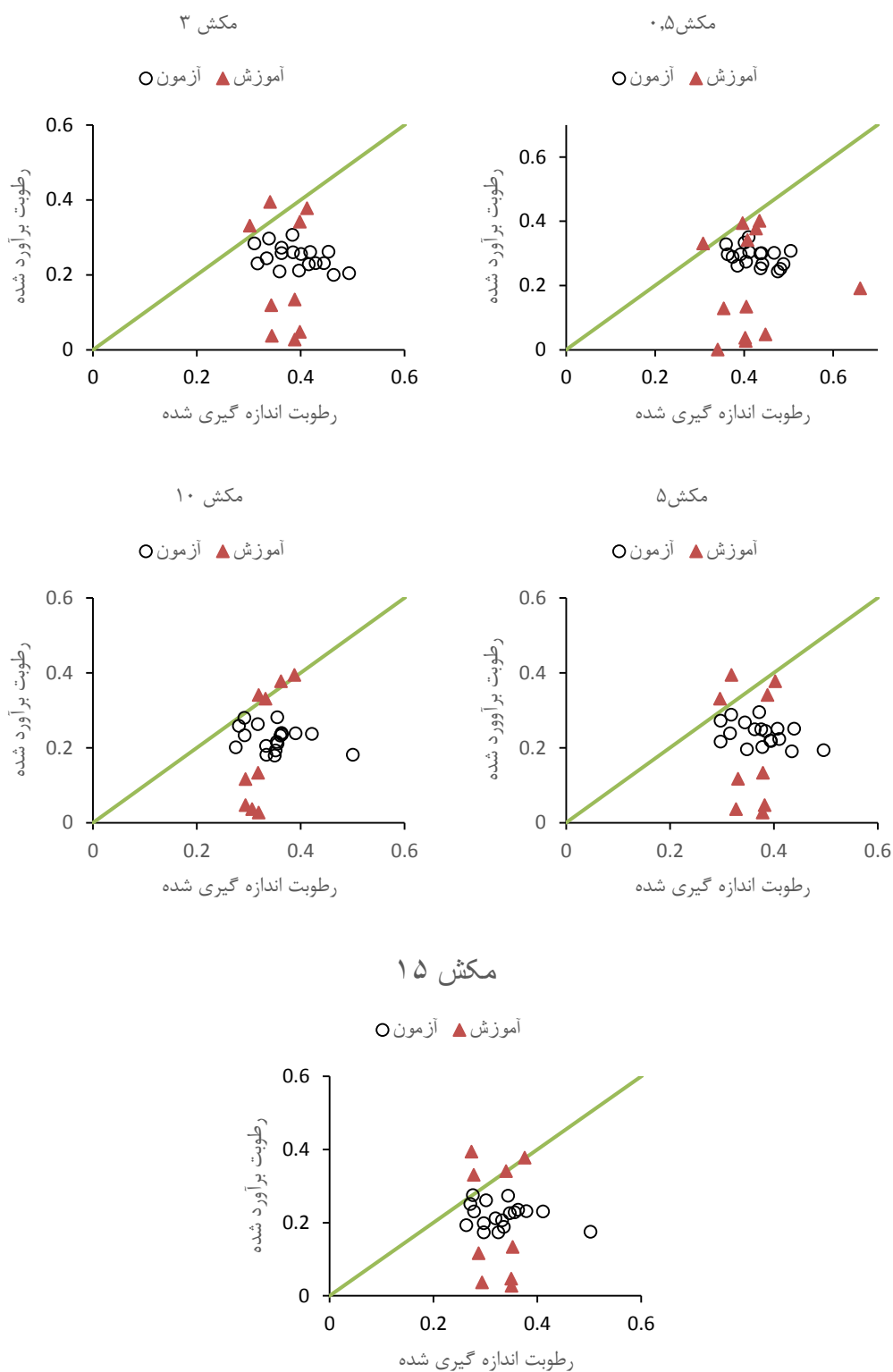






شکل ۴-۱۳ مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و برآورد شده پارامترهای فیزیکی با استفاده از بهترین مدل رگرسیون نسبت به خط ۱:۱





شکل ۴-۱۴ مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و برآورد شده پارامترهای فیزیکی-شیمیایی با استفاده از بهترین مدل رگرسیون نسبت به خط ۱:۱

۲-۳-۲-۴- روش شبکه عصبی

در روش دوم تعیین منحنی نگهداشت رطوبتی خاک با استفاده از معادله‌ی ون گنوختن، رابطه‌ی بین هر ۵ پارامتر این معادله با پارامترهای فیزیکی و فیزیکی-شیمیایی خاک به‌وسیله‌ی شبکه‌ی عصبی مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور از یک شبکه‌ی عصبی مشابه با شبکه‌ی مورد استفاده برای توابع انتقالی نقطه‌ای استفاده شد. همچنین با استفاده از مقادیر خطای RMSE و ضریب تعیین R^2 عملکرد شبکه برای پیش‌بینی هر ۵ پارامتر معادله ون گنوختن در هر دو گروه از داده‌های آموزش و آزمون مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج حاصل از آن در جدول‌های (۴-۱۷) تا (۴-۲۰) نشان داده شد. برای هر پارامتر معادله‌ی ون گنوختن، پارامتری که کمترین مقدار خطای (RMSE) را داشت به‌عنوان بهترین ورودی معرفی شد.

مطابق با جدول‌های (۴-۱۷)، (۴-۱۸)، (۴-۱۹) و (۴-۲۰) باینکه شبکه عصبی می‌تواند در دو ورودی پارامترهای فیزیکی و پارامترهای فیزیکی-شیمیایی چه در مرحله‌ی آموزش و چه در مرحله‌ی آزمون پیش‌بینی درستی از مقدار پارامتر θ_s داشته باشد اما هیچ‌کدام از ورودی‌های فوق پیش‌بینی درستی از پارامتر α ندارد. در مرحله‌ی آزمون، شبکه‌ی عصبی در پیش‌بینی مقدار تمام پارامترهای معادله‌ی ون گنوختن در ورودی پارامترهای فیزیکی-شیمیایی، عملکرد بهتری را نسبت به ورودی پارامترهای فیزیکی داشته است.

جدول ۴-۱۷ پارامترهای فیزیکی مرحله آموزش

پارامتر	تعداد پارامتر ورودی	تابع انتقال	تعداد نرون	RMSE(m ³ /m ³)	R ²
θ_r	۴	tansig	۱۶	۰/۰۷۳	۰/۷۴
θ_s	۴	tansig	۱۶	۰/۰۲۹	۰/۷۸
α	۵	tansig	۶	۷۲/۱۸۲	۰/۸۰
n	۴	logsig	۵	۰/۰۷۶	۰/۹۱
m	۶	elliotsig	۱۲	۰/۰۴۴	۰/۸۶

جدول ۴-۱۸ پارامترهای فیزیکی - شیمیایی مرحله آموزش

پارامتر	تعداد پارامتر ورودی	تابع انتقال	تعداد نورون	RMSE(m ³ /m ³)	R ²
θ_r	۱۷	elliotsig	۵	۰/۰۸۹	۰/۶۳
θ_s	۱۵	tansig	۱۷	۰/۰۱۹	۰/۸۹
α	۱۵	tansig	۵	۷/۵۲	۰/۹۹
n	۱۲	tansig	۷	۰/۰۶۱	۰/۹۰
m	۱۴	tansig	۲	۰/۰۳۳	۰/۹۰۴

جدول ۴-۱۹ پارامترهای فیزیکی مرحله آزمون

پارامتر	تعداد پارامتر ورودی	تابع انتقال	تعداد نورون	RMSE(m ³ /m ³)	R ²
θ_r	۶	elliotsig	۱۶	۰/۱۲۶	۰/۱۲۰
θ_s	۴	logsig	۱۲	۰/۰۷۴	۰/۱۸۶
α	۶	elliotsig	۹	۹۸۹/۳۱	۰/۴۷
n	۵	elliotsig	۱۳	۰/۳۲۳	۰/۱۹۶
m	۶	elliotsig	۱۷	۰/۱۳۶	۰/۲۳۵

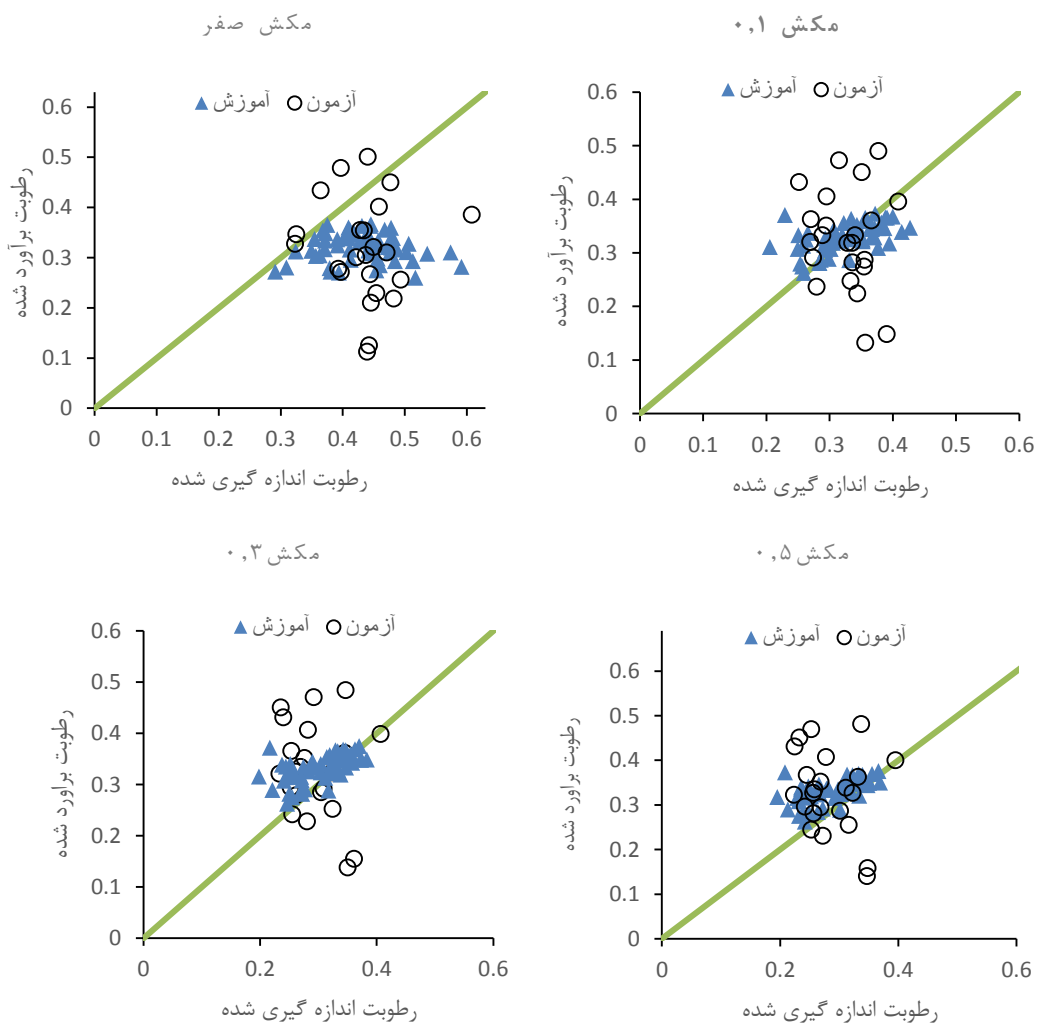
جدول ۴-۲۰ پارامترهای فیزیکی شیمیایی مرحله آزمون

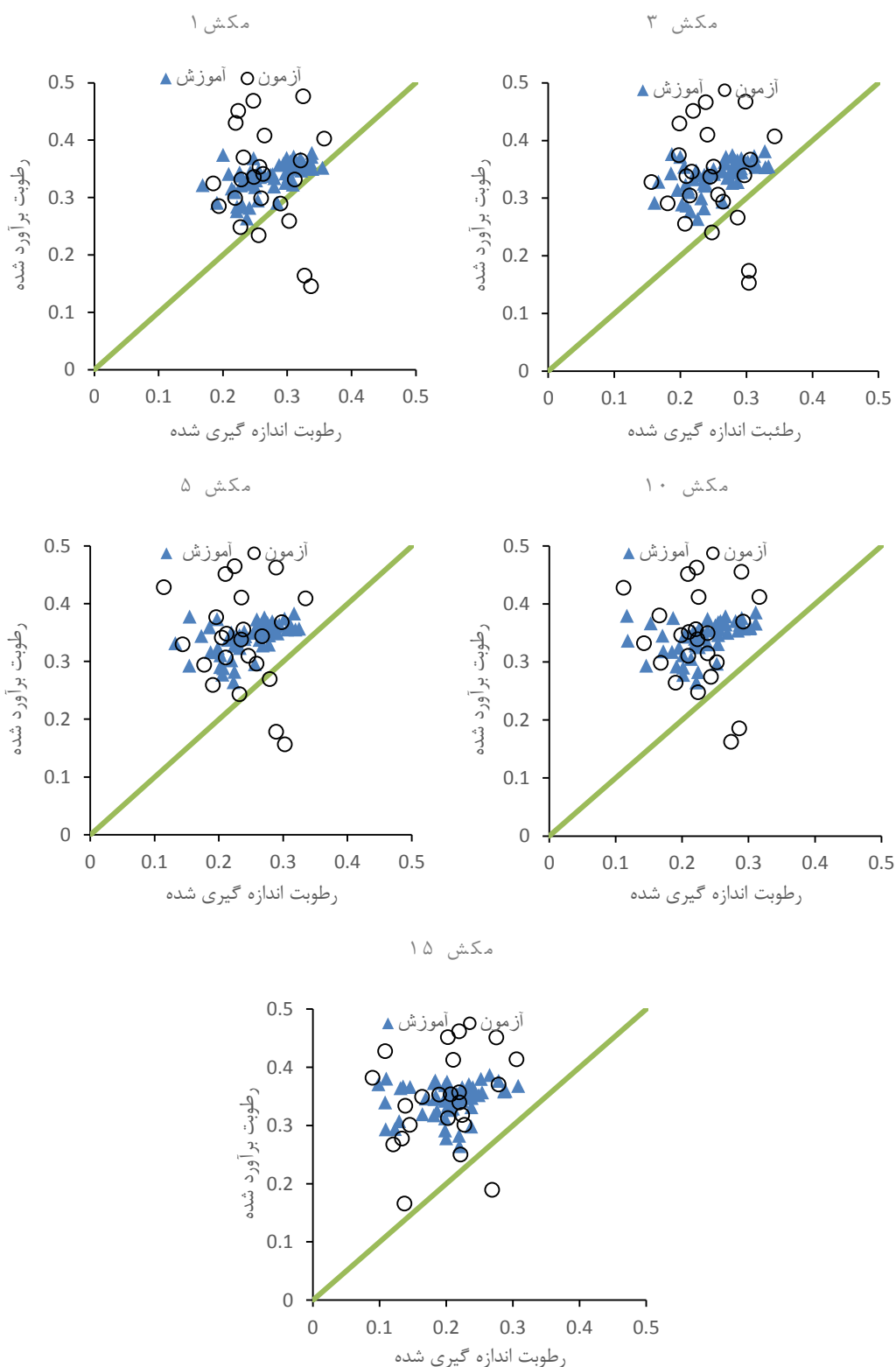
پارامتر	تعداد پارامتر ورودی	تابع انتقال	تعداد نورون	RMSE(m ³ /m ³)	R ²
θ_r	۱	elliotsig	۱۹	۰/۰۲۳	۰/۲۲
θ_s	۱۵	elliotsig	۳	۰/۰۵۱۲	۰/۷۱
α	۱۷	tansig	۱۱	۸۷۳/۶۲	۰/۹۴
n	۱۶	tansig	۱	۰/۳۰۸	۰/۲۸
m	۱۶	logsig	۱۵	۰/۱۲۲	۰/۳۶۹

پس از تعیین بهترین مقدار پارامترهای معادله‌ی ون گنوختن، با استفاده از این پارامترها مقدار رطوبت خاک در هر دو گروه از داده‌های آموزش و آزمون محاسبه گشت. شکل‌های (۴-۱۵) و (۴-۱۶) نمودار مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت را در برابر مقادیر برآورد شده‌ی آن، نسبت به خط یک‌به‌یک نشان داده است. با توجه به شکل‌های (۴-۱۵) و (۴-۱۶) در مکش صفر برای هر دو ورودی پارامترهای فیزیکی و پارامترهای فیزیکی-شیمیایی، هم در مرحله‌ی آموزش و هم در مرحله‌ی آزمون مقادیر پیش‌بینی شده کمتر از مقادیر اندازه‌گیری است. همچنین در بین مکش‌ها، مکش ۰/۱ بهترین مقدار پیش‌بینی را داشته است. در ورودی پارامترهای فیزیکی از مکش ۰/۳ به بعد مقادیر پیش‌بینی بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری

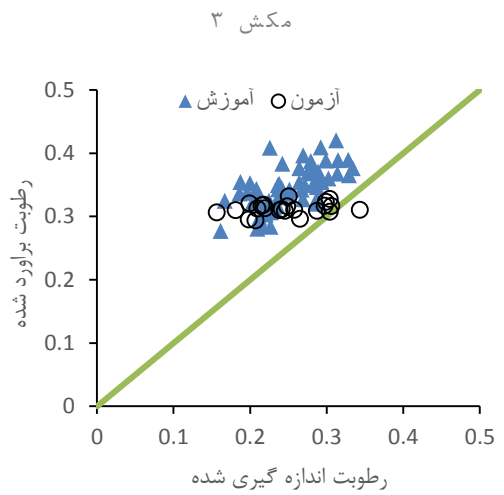
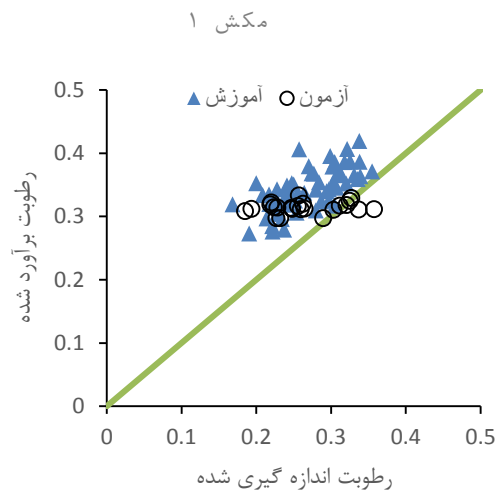
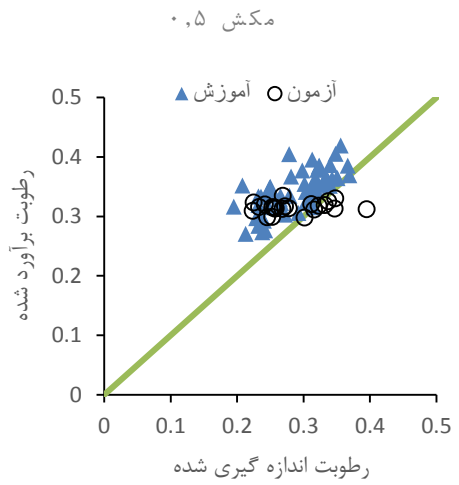
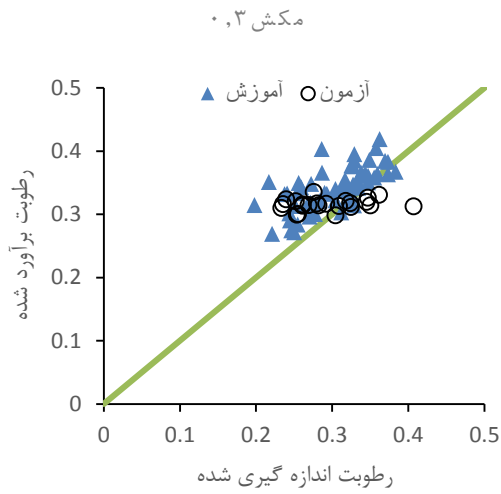
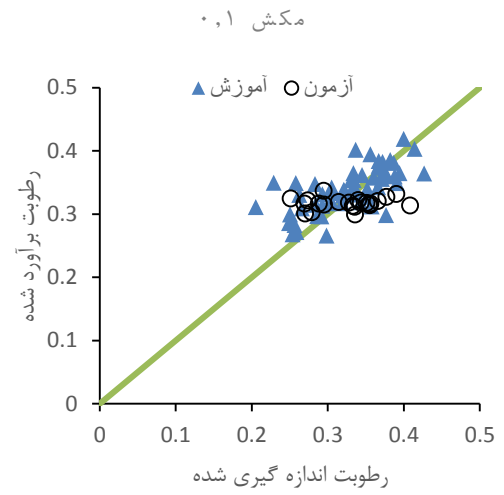
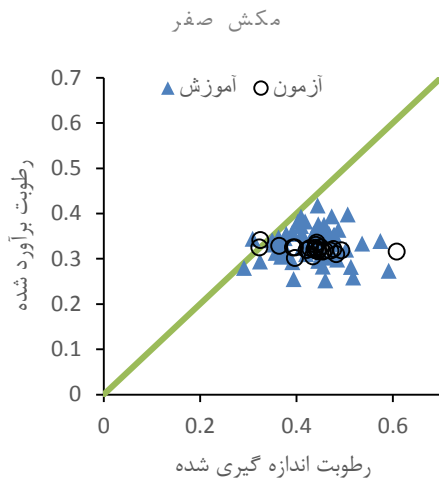
شده است و در ورودی پارامترهای فیزیکی-شیمیایی از مکش ۰/۵ به بعد مقادیر پیش‌بینی بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری بوده است. در مکش ۰/۳ حالت پارامترهای فیزیکی-شیمیایی مقادیر پیش‌بینی کمتر از مقادیر اندازه‌گیری است.

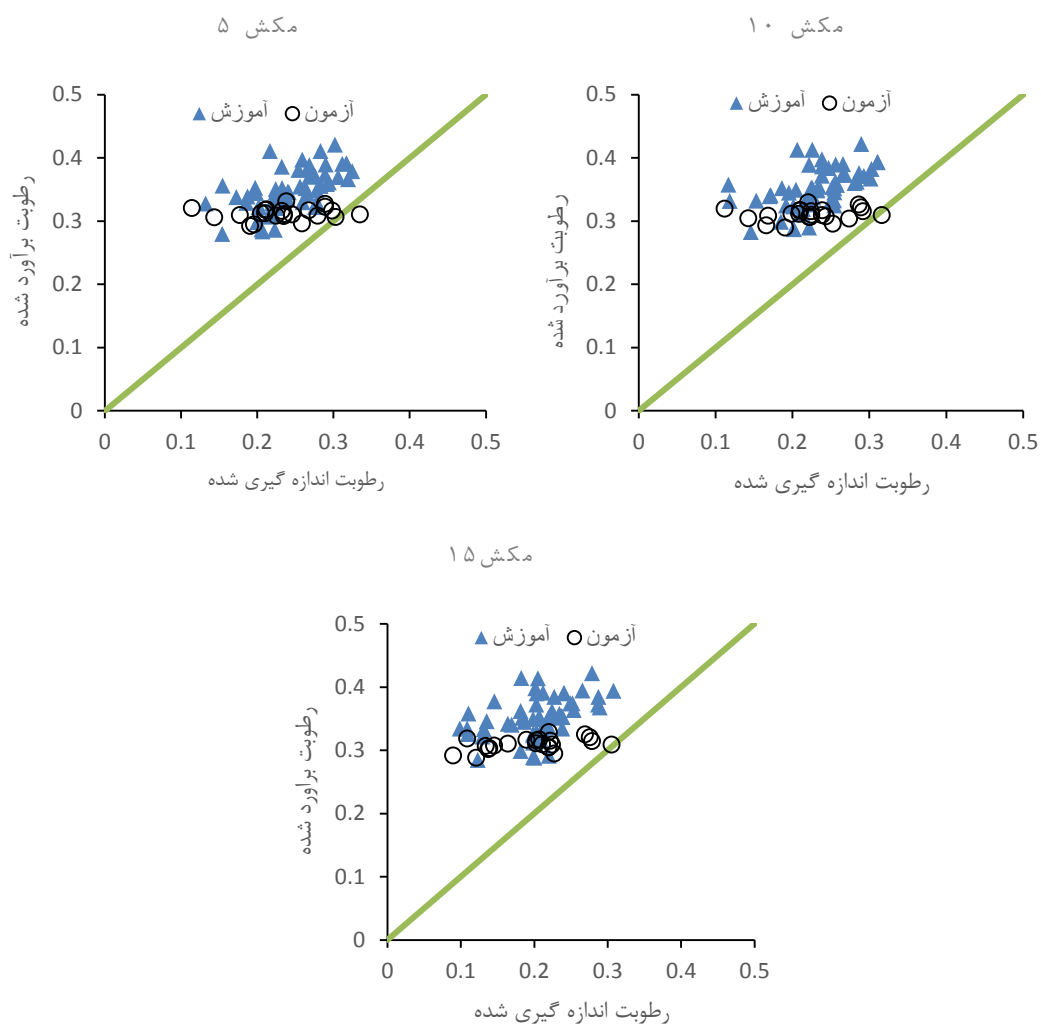
از مقایسه‌ی بین روش رگرسیون خطی و روش شبکه‌ی عصبی در محاسبه‌ی پارامترهای معادله‌ی ون‌گنوختن این نتیجه به دست آمد که پیش‌بینی پارامترهای تابع ون‌گنوختن به‌وسیله‌ی شبکه‌ی عصبی به‌مراتب جواب‌های بهتری را نسبت به رگرسیون خطی داشته است.





شکل ۴-۱۵ مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و برآورد شده با استفاده از پارامتر و ن‌گنوختن، پارامترهای فیزیکی تأثیرگذار با استفاده از بهترین مدل شبکه عصبی نسبت به خط ۱:۱





شکل ۴-۱۶ مقادیر رطوبت اندازه گیری شده و برآورد شده پارامترهای فیزیکی - شیمیایی با استفاده از بهترین مدل شبکه عصبی نسبت به خط ۱:۱

فصل ۵ : نتیجہ گیری و پیشہادہا

۱-۵- نتیجه گیری

۱-۱-۵- برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک در بافت لوم

- مدل درنر و ون گنوختن-RETC به علت نزدیک بودن مقادیر پیش‌بینی شده به مقادیر اندازه‌گیری شده بهترین عملکرد را در برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک دارند. همچنین مدل درنر بهترین عملکرد را در برآورد آب قابل دسترس دارد. مدل کمپل ضعیف‌ترین عملکرد در پیش‌بینی رطوبت دارد. لذا برای پیش‌بینی منحنی نگهداشت رطوبتی خاک در بافت لوم در منطقه مورد مطالعه استفاده از مدل درنر و ون گنوختن-RETC پیشنهاد می‌گردد.

- از بین پنج مدل مورد استفاده مدل ون گنوختن-RETC بهترین عملکرد را در بین سه شاخص آماری RMSE، ME و GSDER دارد. چراکه مقدار خطای $RMSE=0/00916$ و $ME=-0/00015$ در این مدل نسبت به سایر مدل‌ها به صفر نزدیک‌تر و مقدار خطا $GSDER=1/024$ به یک نزدیک‌تر است.

۲-۱-۵- برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک در بافت سیلت لوم

- مدل درنر و ون گنوختن-RETC به علت نزدیک بودن مقادیر پیش‌بینی شده به مقادیر اندازه‌گیری شده بهترین عملکرد را در برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک دارند. همچنین مدل درنر بهترین عملکرد را در برآورد آب قابل دسترس دارد. مدل کمپل ضعیف‌ترین عملکرد در پیش‌بینی رطوبت دارد. لذا برای پیش‌بینی منحنی نگهداشت رطوبتی خاک در بافت لوم در منطقه مورد مطالعه استفاده از مدل درنر پیشنهاد می‌گردد.

- از بین پنج مدل مورد استفاده مدل درنر بهترین عملکرد را در بین سه شاخص آماری RMSE، ME و GMER دارد. چراکه مقدار خطای $RMSE=0/0038$ و $ME=-0/000044$ در این مدل نسبت به سایر مدل‌ها به صفر نزدیک‌تر و مقدار خطا $GMER=1/00024$ به یک نزدیک‌تر است.

۳-۱-۵- مقایسه نقطه‌ای رطوبت به روش رگرسیون (MLR) و شبکه عصبی مصنوعی

(ANN)

- مقایسه نتایج نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی دقت بالاتر و خطای کمتری نسبت به توابع انتقالی رگرسیونی در تخمین مقدار رطوبت دارد. همچنین نتایج نشان داد که شبکه عصبی، توابع نقطه ای را در تمام مکش‌ها بهتر از توابع پارامتریک برآورد کرده است.

۴-۱-۵- مقایسه توابع انتقالی نقطه‌ای رطوبت با تابع پارامتریک مدل ون گنوختن

- رگرسیون خطی در هیچ‌یک از حالت‌های فیزیکی و فیزیکی-شیمیایی چه در مرحله‌ی آموزش و چه در مرحله‌ی آزمون توانایی پیش‌بینی درست از پارامترهای معادله‌ی ون گنوختن را ندارد.

- از مقایسه‌ی بین روش رگرسیون خطی و روش شبکه‌ی عصبی در محاسبه‌ی پارامترهای معادله‌ی ون گنوختن این نتیجه به دست آمد که پیش‌بینی پارامترهای تابع ون گنوختن به وسیله‌ی شبکه‌ی عصبی به مراتب جواب‌های بهتری را نسبت به رگرسیون خط داشته است.

۲-۵- پیشنهادها

- ۱- برای افزایش دقت کار از مناطق مختلف با تعداد نمونه‌های بیشتر استفاده شود.
- ۲- مدل و توابع انتقالی بیشتری جهت برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک ارزیابی گردد.
- ۳- توصیه می‌شود توابع انتقالی بر مبنای روش‌های بهینه سازی نظیر الگوریتم ژنتیک و ماشین بردار پشتیبان و ... توسعه یافته و نتایج مورد بررسی قرار گیرد.

پیوست ها

همان گونه که قبلاً بیان شد جهت اشتقاق توابع انتقالی نقطه‌ای و توسعه معادله ون گنوختن-RETC در این تحقیق از روش شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است که کد برنامه متلب آن در جدول پ-۱ و جدول پ-۲ آورده شده است. همچنین رطوبت ظرفیت زراعی و رطوبت نقطه پژمردگی دائم اندازه گیری شده بافت لوم و سیلت لوم در جدول پ-۳ و جدول پ-۴ ارائه شده است.

جدول پ-۱- برنامه کامپیوتری محاسبه‌ی توابع نقطه‌ای به روش شبکه عصبی مصنوعی

```
%% Start of Program
clc
clear
close all
%% Data Loading
Data_1 =load('input tr.txt');
Data_2 =load('output tr.txt');
Data_3 =load('input ts.txt');
Data_4 =load('output ts.txt');
Xtr = Data_1';
Ytr= Data_2';
Xts = Data_3';
Yts = Data_4';
n=1;
mcn{1,1}='num of
test';mcn{1,2}='Potential';mcn{1,3}='case';mcn{1,4}='train fun
hiddenLayer';
mcn{1,5}='num of hiddenlayer';mcn{1,6}='mae tr';mcn{1,7}='mae
ts';mcn{1,8}='sse tr';mcn{1,9}='sse ts';mcn{1,10}='mse tr';
mcn{1,12}='mse ts';mcn{1,11}='R tr%';mcn{1,13}='R ts%';
Pishbini=cell(n);bayas=cell(n);vaznIW=cell(n);vaznLW=cell(n);mcnT=ce
ll(n);netT=cell(n);
%% Network Structure
% Create Network
for i=1:9
    Ytr= Data_2(:,i)';
    Yts= Data_4(:,i)';
    for j=1:19
        Xtr= Data_1(:,1:j)';
        Xts= Data_3(:,1:j)';
        for k=1:19
            numHiddenNeurons = [k];
            for l=1:4
                if l==1
                    TF = {'logsig'};
                elseif l==2
                    TF = {'tansig'};
                elseif l==3
                    TF = {'purelin'};
                else
                    TF = {'elliotsig'};
                end
                n=n+1;
                net = newff(Xtr,Ytr,numHiddenNeurons,TF);
```

```

net.trainFcn='trainlm';
net.trainParam.epochs = 50;
net.trainParam.max_fail = 20;
net.trainParam.min_grad=1e-15;
net.trainParam.mu_max=1e15;
% %Train and Apply Network
[net1] = train(net,Xtr,Ytr);
netT(n) = [net1];
%% Assessment
outputstr = sim(net1,Xtr);
outputsts = sim(net1,Xts);
mcn{n,1}=n;
mcn{n,2}=i;
mcn{n,3}=j;
train_fun=TF;
mcn{n,4}=train_fun(1,1);
mcn{n,5}=k;
mcn{n,6} = mae(outputstr, Ytr);
mcn{n,7} = mae(outputsts, Yts);
mcn{n,8} = MyFunction(outputstr, Ytr);
mcn{n,9} = MyFunction(outputsts, Yts);
mcn{n,10} = mse(outputstr, Ytr);
r=corrcoef(outputstr, Ytr);
mcn{n,11}=r(1,2);
mcn{n,12} = mse(outputsts, Yts);
r=corrcoef(outputsts, Yts);
mcn{n,13}=r(1,2);
lwn{n}=net1.LW;
iwn{n}=net1.IW;
bn{n}=net1.b;
Pishbinitr{n}=outputstr;
Pishbinitr{n}=outputsts;
end
end
end
end
end

```

جدول پ-۲- برنامه کامپیوتری محاسبه‌ی پارامترهای تابع ون گنوختن-RETC

```

%% Start of Program
clc
clear
close all
%% Data Loading
Data_1 =load('inputVG tr.txt');
Data_2 =load('outputVG tr.txt');
Data_3 =load('inputVG ts.txt');
Data_4 =load('outputVG ts.txt');
XVGtr = Data_1';
YVGtr= Data_2';
XVGts = Data_3';
YVGts = Data_4';
n=1;
mcn{1,1}='num of
test';mcn{1,2}='Potential';mcn{1,3}='case';mcn{1,4}='train fun
hiddenLayer';
mcn{1,5}='num of hiddenlayer';mcn{1,6}='maeVG tr';mcn{1,7}='maeVG
ts';mcn{1,8}='sseVG tr';mcn{1,9}='sseVG ts';mcn{1,10}='mseVG tr';
mcn{1,12}='mseVG ts';mcn{1,11}='RVG tr%';mcn{1,13}='RVG ts%';

```

```

Pishbini=cell(n);bayas=cell(n);vaznIW=cell(n);vaznLW=cell(n);mcnT=cell(n);
%% Network Structure
% Create Network
for i=1:5
    YVGtr= Data_2(:,i)';
    YVGts= Data_4(:,i)';
    for j=1:19
        XVGtr= Data_1(:,1:j)';
        XVGts= Data_3(:,1:j)';
        for k=1:19
            numHiddenNeurons = [k];
            for l=1:4
                if l==1
                    TF = {'logsig'};
                elseif l==2
                    TF = {'tansig'};
                elseif l==3
                    TF = {'purelin'};
                else
                    TF = {'elliotsig'};
                end
                n=n+1;
                net = newff(XVGtr,YVGtr,numHiddenNeurons,TF);
                net.trainfcn='trainlm';
                net.trainParam.epochs = 50;
                net.trainParam.max_fail = 20;
                net.trainParam.min_grad=1e-15;
                net.trainParam.mu_max=1e15;
            % %Train and Apply Network
            [net1] = train(net,XVGtr,YVGtr);
            %% Assesment
            outputsVGtr = sim(net1,XVGtr);
            outputsVGts = sim(net1,XVGts);
            mcn{n,1}=n;
            mcn{n,2}=i;
            mcn{n,3}=j;
            train_fun=TF;
            mcn{n,4}=train_fun(1,1);
            mcn{n,5}=k;
            mcn{n,6} = mae(outputsVGtr, YVGtr);
            mcn{n,7} = mae(outputsVGts, YVGts);
            mcn{n,8} = MyFunction(outputsVGtr, YVGtr);
            mcn{n,9} = MyFunction(outputsVGts, YVGts);
            mcn{n,10} = mse(outputsVGtr, YVGtr);
            r=corrcoef(outputsVGtr, YVGtr);
            mcn{n,11}=r(1,2);
            mcn{n,12} = mse(outputsVGts, YVGts);
            r=corrcoef(outputsVGts, YVGts);
            mcn{n,13}=r(1,2);
            lwn{n}=net1.LW;
            iwn{n}=net1.IW;
            bn{n}=net1.b;
            Pishbinitr{n}=outputsVGtr;
            Pishbinits{n}=outputsVGts;
            end
        end
    end
end
end
end

```


جدول پ-۳- مقادیر رطوبت FC و PWP اندازه گیری شده بافت لوم

نمونه خاک	FC	PWP
۱	۰/۳۵	۰/۱۳۷
۳	۰/۲۵۵	۰/۱۲۰
۱۰	۰/۲۷۷	۰/۱۲۹
۵۸	۰/۲۹۲	۰/۲۲۸
۶۰	۰/۲۹۱	۰/۲۱۹
۷۵	۰/۲۷۰	۰/۱۸۱
۷۶	۰/۲۷۲	۰/۲۱۹
۸۰	۰/۲۷۱	۰/۱۹۸

جدول پ-۴- مقادیر رطوبت FC و PWP اندازه گیری شده بافت لوم

نمونه خاک	FC	PWP
۵	۰/۳۲۷	۰/۲۵۳
۹	۰/۳۲۴	۰/۱۳۳
۱۲	۰/۳۱۹	۰/۱۳۱
۱۴	۰/۳۱۱	۰/۲۰۳
۱۶	۰/۳۶۱	۰/۲۶۹
۱۷	۰/۳۲۹	۰/۲۴۰
۲۰	۰/۲۸۶	۰/۱۸۲
۳۷	۰/۳۳۷	۰/۲۰۲
۶۸	۰/۳۱۷	۰/۲۰۶

منابع

۱. استواری ی، بیگی ح، (۱۳۹۲) "پیشنهاد توابع انتقالی تخمین رطوبت خاک بر اساس بعد فرکتال بافت خاک" نشریه آب و خاک مشهد، جلد ۲۷، شماره ۳، صفحه ۶۴۱-۶۳۰.
۲. استواری ی، فاریابی الف، موسوی ع الف، (۱۳۹۶) "ارزیابی و مقایسه دو مجموعه توابع انتقالی در برآورد برخی نقاط منحنی مشخصه رطوبتی خاک" نشریه پژوهش آب در کشاورزی، جلد ۳۱، شماره ۲، صفحه ۲۳۴-۲۴۳.
۳. اسماعیل نژاد ل، سیدمحمدی ج، شعبانپور م، (۱۳۹۵) "مقایسه روش‌های فرکتال در تخمین منحنی نگهداشت رطوبتی خاک" نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۶، شماره ۴/۱، صفحه ۱۹۳-۲۰۵.
۴. اصغرزاد دانش، س، (۱۳۹۴) "تخمین پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی خاک با استفاده از روش معکوس" پایان‌نامه کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان.
۵. افراسیاب پ، (۱۳۸۰) "تخمین منحنی رطوبتی خاک با استفاده از مدل کمپل در منطقه ورامین" مجله پژوهش و سازندگی، شماره ۵۳، صفحه ۶۱-۵۸.
۶. امیر عابدی ح، اصغری ش، مصری گندیشمین ت، کیوان بهجو ف، (۱۳۹۲) "برآورد رطوبت‌های ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی و آب قابل‌استفاده در خاک‌های دشت اردبیل با استفاده از مدل رگرسیونی و شبکه عصبی" مجله تحقیقات کاربردی خاک، جلد ۱، شماره ۱، صفحه ۸۸-۱۰۹.
۷. باباییان الف، همایی م، نوروزی ع الف، (۱۳۹۳) "عملکرد توابع انتقالی طیفی و نقطه‌ای برای برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی خاک" تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۴۵، شماره ۴، صفحه ۴۹۰-۴۷۵.
۸. بای بوردی م، (۱۳۸۲) "فیزیک خاک" چاپ هفتم، انتشارات دانشگاه تهران، ۶۷۱ صفحه.
۹. بای بوردی م، (۱۳۸۸) "فیزیک خاک" چاپ نهم، انتشارات دانشگاه تهران، ۶۵۸ صفحه.
۱۰. برزگر ع الف، (۱۳۸۰) "فیزیک خاک پیشرفته" چاپ اول، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، شماره ۲۳۵، ۳۳۲ صفحه.
۱۱. بلیانی ع، شرفا م، امید م، (۱۳۹۱) "تخمین نقاط شاخص منحنی رطوبتی تعدادی از خاک‌های

- آهکی به کمک پارامترهای زودیافت خاک به روش شبکه عصبی مصنوعی " مجله پژوهش‌های حفاظت آب‌و خاک، جلد نوزدهم، شماره سوم، صفحه ۱۶۷-۱۸۴.
۱۲. ترابی فارسی ن، قهرمان، ب، (۱۳۸۶) " مقایسه چند تابع انتقالی متداول برای برآورد منحنی رطوبتی خاک در چند خاک ایران " مجله آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۱، صفحه ۴۵-۵۷.
۱۳. جلیوند ک، فرهادی ب، (۱۳۹۱) " ارزیابی چند تابع انتقالی در برآورد منحنی رطوبتی برای خاک‌های منطقه ماهیدشت " کنفرانس ملی راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار، تهران، وزارت کشور، صفحه ۱-۷.
۱۴. جوانشیر ش، بیات ح، (۱۳۹۵) " تأثیر شاخص انبساط آزاد بر بهبود تخمین منحنی رطوبتی خاک " نشریه دانش آب‌و خاک، جلد ۲۱، شماره ۱/۲، صفحه ۹۳-۱۱۳.
۱۵. حسنی پاک ع الف، شرف الدین م، (۱۳۸۰) " تحلیل داده‌های اکتشافی " انتشارات دانشگاه تهران، ۹۸۷ صفحه.
۱۶. خداوردی لو ح، همایی م، (۱۳۸۳) " تخمین هوشمند منحنی رطوبتی خاک با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی " دومین کنفرانس ملی منابع آب و خاک، شیراز، دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز، صفحه ۱-۸.
۱۷. خداوردی لو ح، همایی م، (۱۳۹۰) " اشتقاق توابع انتقالی خاک به منظور برآورد منحنی مشخصه رطوبتی " مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، شماره ۳(۱۰)، صفحه ۳۵-۴۶.
۱۸. ذوالفقاری ع الف، شرفا م، محمدی م ح، لیاقت ع م، هورفوع ح، گرجی م، (۱۳۹۲) " یک روش تحلیلی جدید برای برآورد منحنی رطوبت خاک با استفاده از داده‌های نفوذ افقی آب در ستون خاک " مجله آب‌و خاک (علوم و صنایع غذایی)، جلد ۲۷، شماره ۱، صفحه ۱۴۵-۱۵۷.
۱۹. ذوالفقاری، ع ا، شرفاء ف م، محمدی م ح، عباسپور ح، (۱۳۹۲) " برآورد پارامترهای مدل منحنی رطوبتی فردلاند و ژیانگ با استفاده از یک نقطه اندازه‌گیری شده " مجله پژوهش‌های آب‌و خاک، شماره ۱(۲۷)، صفحه ۱-۱۲.

۲۰. رضایی ع، نیشابوری م، جعفرزاده ع، (۱۳۸۰) "ارزیابی مدل کمپل برای تعیین منحنی خصوصیات آب خاک" مجله علوم کشاورزی ایران، شماره ۳، صفحه ۵۴۱-۵۵۰.
۲۱. رضوی س، رسول زاده ع م ر، (۱۳۸۹) "ارزیابی نرم افزارهای رزتا و سویل پار ۲ در برآورد منحنی مشخصه آب خاک" سومین همایش ملی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، مهندسی علوم آب، صفحه ۱-۱۲.
۲۲. رضوی قلعه جوق س، رسول زاده ع، نیشابوری م ر (۱۳۹۳) "ارزیابی توابع انتقالی مختلف برای برآورد منحنی رطوبتی خاک در شهرستان نقده" نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ب، جلد ۲۸، شماره ۳، صفحه ۶۱۳-۶۲۴.
۲۳. رضایی م، صالحی خوشکرودی ش، لیاقت ع الف، (۱۳۹۲) "برآورد منحنی رطوبتی خاک با استفاده از اندازه گیری دونقطه ای" مجله پژوهش آب در کشاورزی، جلد ۲۷، شماره ۲، صفحه ۳۳۸-۳۴۶.
۲۴. زکی زاده ف، رسول زاده ع، (۱۳۸۹) "ارزیابی توابع انتقالی مختلف برای برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع و منحنی رطوبتی خاک" دومین کنفرانس سراسری مدیریت جامع منابع آب کرمان، انجمن مهندسی آبیاری و آب ایران، صفحه ۱-۱۰.
۲۵. شیرانی ح، رفیع نژاد ن، (۱۳۹۰) "برآورد برخی ویژگی های دیرپافت خاک های استان کرمان با استفاده از توابع انتقالی رگرسیون و شبکه عصبی مصنوعی" مجله پژوهش های خاک، جلد ۲۵، شماره ۴، صفحه ۳۴۹-۳۵۹.
۲۶. طلوعی ر، نیشابوری ح ر، رسول زاده ع، (۱۳۹۴) "برآورد پارامترهای شاخه خشک و خیس شدن منحنی رطوبتی بروکس-کوری با استفاده از توابع انتقالی" نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۵، شماره ۳، صفحه ۱۹۵-۲۱۰.
۲۷. عباسی ف، (۱۳۸۷) "فیزیک خاک پیشرفته" چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۵۰ صفحه.
۲۸. علیزاده الف، (۱۳۹۰) "رابطه آب خاک و گیاه" چاپ ۱۳، دانشگاه امام رضا (ع)، ۴۷۲ صفحه.
۲۹. علیزاده الف، (۱۳۸۳) "فیزیک خاک" انتشارات دانشگاه امام رضا. ۴۳۸ صفحه.

۳۰. فاضلی سنگانی م، پيله ور شهری الف، (۱۳۹۲) " تخمین منحنی رطوبتی خاک با استفاده از بعد فرکتالی اندازه ذرات خاک " پژوهش‌های آبخیزداری، شماره ۹۹، صفحه ۱۲۷-۱۳۲.
۳۱. فولادمند ح ر، هادیپور س، (۱۳۹۰) " ارزیابی توابع انتقالی پارامتریک برای تخمین منحنی مشخصه آب خاک در استان فارس " مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال ۱۵، شماره ۵۸، صفحه ۲۵-۳۷.
۳۲. فولادی دورهانی م، زند پارسا ش، (۱۳۹۵) " ارتباط بین پارامترهای منحنی مشخصه خاک با روش ون گنوختن و سطح ویژه آن " دومین کنگره ملی آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۴، صفحه ۱۰۱-۱۰۶.
۳۳. فیروزی الف م، همایی م، (۱۳۸۴) " ایجاد توابع انتقالی نقطه ای برای برآورد منحنی رطوبتی خاک‌های گچی " مجله تحقیقاتی مهندسی کشاورزی، جلد ۶، شماره ۲۴، صفحه ۱۳۱-۱۴۲.
۳۴. قربانی دشتکی ش، همایی م، (۱۳۸۱) " برآورد پارامتریک توابع هیدرولیکی بخش غیر اشباع خاک با استفاده از توابع انتقالی خاک " مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، دوره ۳، شماره ۱۲، صفحه ۱-۱۶.
۳۵. قنبریان علویجه ب، لیاقت ع، (۱۳۹۰) " ارزیابی توابع انتقالی و تاثیر ماده آلی در پیش‌بینی رطوبت اشباع " نشریه آب و خاک، جلد ۲۵(۵)، شماره ۱۶، صفحه ۱۰-۲۴.
۳۶. کاظمی پور اسفهلان م، محمدی م ح، واعظی ع ر، (۱۳۹۷) " تخمین نقطه‌ای منحنی رطوبتی خاک با استفاده از برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک " فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات کاربردی خاک، جلد ۶، شماره ۲، صفحه ۸۴-۹۵.
۳۷. کشکولی ح ع، بقال باحجب م، زینال زاده ک، غفاری پ، (۱۳۸۷) " سنجش قابلیت شبکه‌های عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی سامانه غیرخطی منحنی مشخصه " دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، اهواز، دانشگاه شهید چمران اهواز، صفحه ۱-۸.
۳۸. گنجی آزاد پور ع، رسول زاده ع، عزیزی مبصر ج، (۱۳۹۴) " ارزیابی توانایی توابع انتقالی پارامتریک برای برآورد شاخه جذب منحنی مشخصه آب خاک (مطالعه موردی: شهرستان بویین زهرا) " مجله علوم و مهندسی آبیاری، جلد ۳۹، شماره ۳، صفحه ۱۰۷-۱۱۹.

۳۹. مرادی ف، خلیل مقدم ب، جعفری س، قربانی دشتکی ش، (۱۳۹۰) "برآورد نقطه‌ای و پارامتریک منحنی نگهداشت آب در خاک با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه در چند کشت و صنعت استان خوزستان" پنجمین همایش ملی فن آوران نیشکر ایران. صفحه ۳۲۸-۳۳۷.

۴۰. مؤذن زاده ر، قهرمان ب، فتحعلیان ف، خشنودیزدی ع الف، (۱۳۸۷) "تأثیر نوع و تعداد متغیرهای ورودی در برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی و هدایت هیدرولیکی اشباع" نشریه آب‌و خاک، شماره ۳، صفحه ۷۰-۵۷.

۴۱. مؤذن زاده ر، قهرمان ب، داوری ک، خشنودیزدی ع الف، (۱۳۸۸) "ارزیابی عملکرد چند تابع داخلی در برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی" نشریه آب‌و خاک، جلد ۳۲، شماره ۴، صفحه ۵۵-۶۶.

۴۲. نبی‌زاده ا، بیگی هرچگانی ح، (۱۳۹۰) "کیفیت برازش چند مدل تجربی منحنی رطوبتی به خاک‌های شهرستان لردگان از استان چهارمحال بختیاری" نشریه آب‌و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۵، شماره ۳، صفحه ۶۳۴-۶۴۵.

43. Abbasi, Y., B. Ghanbarian-Alavijeh, A.M. Liaghat, and M. Shorafa., (2011) "Evaluation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve of saline and saline-alkali soils of Iran" *Pedosphere* 21(2): 230-237.

44. Ahangar-Asr A, Johari A, Javadi A.A., (2012) "An evolutionary approach to modelling the soil-water characteristic curve in unsaturated soils" *Computers & Geosciences*, 25-33.

45. Abbasi Y, Ghanbarian Alavijeh B, Liaghat AM and Shorafa M., (2009) "Predicting Soil moisture retention curve for saline and salin-alkali soils" *The 10th National Conference on Irrigation & Evaporation Reduction*.

46. Allison LE and Moodie CD., (1965) "Chemical and Microbiological Properties. Pp: 1379-1396. In: Black CA (ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 2, Chemical and Microbiological Properties* ASA and SSSA, Madison, WI.

47. Andrenelli, M., C. V. Fiori and S. Pellegrini., (2013) "Soil particle-size analysis up to 250 μm by X-ray granulometer: Device set-up and regressions for data conversion into pipette-equivalent values. *Geoderma* 192: 380-393.

48. Arruda, F.B., Zullo, J., Oliveira, J.B., (1987) "Parâmetros de solo para cálculo de água disponível com base na textura do solo" *Rev. Bras. Ci. Solo* 11, 11–15.
49. Bagarello, V. and Lovino, M., (2012) "Testing the BEST procedure to estimate the soil water retention curve" *Geoderma* 187-188. 67-76.
50. Blake, G.R. and Hartge, K.H. (1986) "Bulk density", In A. Klute (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods* and ed. Agron Monogr. 9. ASA and SSSA: 363-382.
51. Botula, V.D., Comelis, W.M., Baert, G. and Van Ranst, E., (2012) "Evaluation of pedotransfer functions for predicting water retention of soils in Lower Congo (D.R. Congo)" *Agricultural water management*, Vol. 111, Pages: 1-10.
52. Bouma J. (1989) "Using soil survey data for quantitative land evaluation" *Adv. Soil Sci.* 9:177-213.
53. Buszewski, B., and Kowalkowski, T., (2006) "A new model of heavy metal transport in the soil using non-linear artificial neural networks" *Environ. Eng. Sci.* 23; 4:589-595.
54. Brooks, R.H. and A.T. Corey., (1964). *Hydraulic properties of porous media*. Hydrology paper. No. 3. Colorado state Univ. Ft. Collins.co.
- Campbell, G.S., (1974) "A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data" *Soilsci.* 117: 311-314.
55. Cao, H. and Yue, Xingye., (2014). Homogenization of Richard's equation of Van Genuchten- Mualem model. *J. math. Anal. Appl* 412. 391-400.
56. Curtin, D., and Miller, J.J. (2008) "Electrical conductivity and soluble ions. P 161-171. In: Carter MR and Gregorich EG (eds). *Soil Sampling and Methods of Analysis. Chapter 2- Diagnostic methods for soil and environmental management*. Taylor & Francis.
57. Chin, K.B., E.C. Leong, and H. Rahardjo., (2010) "A simplified method to estimate the soil water Characteristic curve" *Can. Geotech. J.* 47:1382-1400.
58. Dexter, A.R., Czyż, E.A., Richard, G., 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.
59. Dijkerman, J.C., (1988) "An Ustult-Aquult-Tropept catena in Sierra Leone, West Africa" II. Land qualities and land evaluation. *Geoderma* 42, 29–49.
60. Ghanbarian-Alavijeh, B., Liaghat, A., Huang, G.H. and van Genuchten, M.TH., (2010) "Estimation of the Van Genuchten soil water retention properties from soil textural data" *Pedosphere*. 20(4): 456-465.

61. Ghanbarian-Alavijeh, B., and H. Millan., (2010)" Point pedotransfer functions for estimating soil water retention curve" *International Agrophysics*. 24: 243-251.
62. Ghorbani Dashtaki S. Homae M. Khodaverdiloo H.,(2010)" Derivation and validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety.
63. Ghorbani Dashtaki, Sh. and M. Homae., (2004)" Using geometric mean particle diameter to derive point and continuous pedotransfer functions" In Whrle, N. and Scheurer, M.(eds.) *EuroSoil*. September 4–12, 2004. Freiburg, Germany. 10(30): 1–10.
64. Hillel, D., (1998)" *Environmental soil physics*" Academic Press, San Diego.
65. Hudson, D.L. and Chon, M.E., (1999)" Neural network and artificial intelligence for biomedical engineering" *IEEE Press*. 306.
66. Helmke, P.A., and Sparks, D.L., (1996)" Lithium, sodium, potassium, rubidium and cesium. P 551-574. In: Helmke, P.A., Johnston, C.T., Loeppert, R.H., Page, A.L., Soltanpour, P.N., Sparks, D.L., Sumner, M.E. and Tabatabai, M.A. (eds). *Methods of Soil Analysis. Part 3- Chemical Methods*. Madison. Wisconsin. USA.
67. Islam N, Wallender WW, Mitchell JP, Wicks S and Howitt RE.,(2006)" Performance evaluation of methods for the estimation of soil hydraulic parameters and their suitability in a hydrologic model. *Geoderma* 134: 135-151.
68. Klute, A., (1986)" Water retention: laboratory methods. *Methods of Soil Analysis: Part Physical and Mineralogical Methods*, 635-662.
69. Lenhard RJ, Parker JC and Mishra S., (1989)" On the correspondence between Brooks-Corey and van Genuchten models" *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 115:744-751.
70. Manyame, C., Morgan, C.L., Heilman, J.L., Fatondji, D., Gerad, B., and Payne, W.A. (2007)" Modeling hydraulic properties of sandy soils of Niger using pedotransfer functions" *Geoderma*, 141:407-415.
71. Mayr, T. and Jarvis, N.J.,(1999)" Pedotransfer functions to estimate soil water retention parameters for a modified Brooks-Corey type model" *Geoderma* 91: 1-9.
72. Medrado .E, Lima . J.E.F.W.,(2014)" Development of pedotransfer functions for estimating water retention curve for tropical soils of the Brazilian savanna" *Contents lists available at Science Direct* 59-66.
73. Merdun, H., Ozer, C., Meral, R. and Apan, M., (2006)" Comparison of artificial neural

network and regression pedotransfer functions for prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity" *Soil & Till. Res.* 90: 108-116 .

74.Mesri Gundoshmian T., (2009)" The use of intelligent systems to optimize drop Combine" PhD Thesis, Engineering of Agriculture Machinery Mechanization Department, University of Tabriz. (In Farsi with English Summary).

75.Minasny, B. and MC Bratney, A., (2007)" Estimating the water retention shape parameter from sand and clay content" *Soil Science Society of American Journal.* 71. 1105-1110.

76.Minasny, B., Mc Bratney, A.B. and Bristaw, K.L. (1999)" Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for wate retention curves. *Geoderma* 93: 225-253.

77.Minyoung, K. and John, E., (2008)"Artificial Neural Network estimation of soil erosion and nutrient concentrations in runoff from land application areas" *Computers-andelectronicsinagriculture.*64:268–275.

78.Mohanty .M, Sinha .N. K, Painuli. D. K, Bandyopadhyay. K. K, Hati . K. M, Sammi Reddyk and Chaudhary . R. S., (2015)" Modelling Soil Water Contents at Field Capacity and Permanent Wilting Point Using Artificial Neural Network for Indian Soils " *The National Academy of Sciences*,38(5), 373–377.

79.Mosaddeghi MR and Mahboubi AA., (2011)" Point pedotransfer functions for prediction of water retention of selected soil series in a semi-aired region of western Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science.* 57(4): 327-342.

80.Namdar-Khojaste, D., Shorafa, M., Omid, M. and Fazeli-Shaghani. M., (2010)"Application of artificial neural networks in modeling soil solution electrical Conductivity" *Soil Sci.* 175: 432-437.

81.Nelson, D.W., and Sommers, LE., (1982)" Total carbon, organic carbon and organic matter.P 539-579. In: Keeney, D.R., Miller, A.L. and Page, A.L. (eds). *Method of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Property.* Second edition. American Society of Agronomy. Madison. Wisconsin of soil data" *Soil Use and Management*, 26, 68–74.

82.Oliveira, L.B., Ribeiro, M.R., Jacomine, P.K.T., Rodrigues, J.J.V., Marques, F.A., (2002)"Funcoes de pedotransferencia para predicao de umidade retida a potencias especificos em solos do estado de Pernambuco. *Rev. Bras. Ci. Solo* 26, 315–323.

83.Pachepsky, Y.A., Timlin, D.J. and Varallyay, G., (1996)" Artificial neural networks to

- estimate soil water retention from easily measurable data" *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 727–773.
84. Pachepsky, Ya.A. and Rawls, W.J., (1999)" Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils" *Journal of Soil Sciences. Soc.Am. J.* 63: 1748-1757.
85. Patil NG, Pal DK, Mandal C and Mandal DK., (2012)" Soil water retention characteristics of vertisols and pedotransfer functions based on nearest neighbor and neural network approach to estimate AWC" *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 138: 1-10.
86. Phuong Nguyen .M , Haghverdi .A, Pue .J, Botula .Y, Khoa .V, Waegeman .W, Cornelis .M. (2017)" Comparison of statistical regression and data-mining techniques in estimating soil water retention of tropical delta soils" *Biosystems Engineering* 53, 12 - 27.
87. Pidgeon, J.D., (1972)" The measurement and prediction of available water capacity of ferralitic soils in Uganda" *J. Soil Sci.* 23, 431–441.
88. Rahim khoob, A., (2009)" Estimation of evapotranspiration based on only air temperature data using artificial neural networks for a subtropical climate in Iran" *J Irrig Drain Eng ASCE* 122. 2: 97–106.
89. Rajkai, K., Kabos, S., and Van Genuchten, M.Th. (2004)" Estimating the water retention curve from soil properties comparison of linear, nonlinear and concomitant variable methods" *Soil & Till. Res.* 79:145-152.
90. Rawls, W.J and Brakensiek, D.L., (1982)" Estimating soil water retention from soil properties" *J. Irrig.Drainage Div. ASCE*:108:166–171.
91. Rawls, W.J., Gish, T.J. and Brakensiek, D.L., (1991)" Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics" *Journal of Soil Sciences*, 9:213–234.
92. Rengasamy, P., R. S. B. Greene, G.W. Ford and A. H. Mehanni., (1984)" Identification of dispersive behaviour and the management of red-brown earths. *Aust. J. Soil Res.* 22: 413-431.
93. Schaap M. G. Leji F. J. and van Genuchten M. Th., (2001)" ROSETTA: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchinal pedotransfer functions" *Journal of Hydrology* 251: 163-176.

- 94.Schaap, M.G., Leij, F.J., and Van Genuchten, M.Th., (1998)" Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties" *Journal of Soil Sciences. Soc.Am. J.* 62: 847-855.
- 95.Shirani H and Rafienejad N., (2012)"Estimating of some missing soil properties with regression pedotransfer functions and neural network in the Kerman" *J. Soil Res.* 25. (4): 349-359. (In Farsi with English Summary)
- 96.Shirazi,M.A.and Boersma,L.,(1984)" A Unifying Quantitative Analysis of Soil Texture" *Soil Science Society of America Journal*, No. 48,PP.124-147.
- 97.Shwetha . P, Varija . K.,(2015)" Soil water retention curve from saturated hydraulic conductivity for sandy loam and loamy sand textured soils" *Aquatic Procedia* 4 , 1142 – 1149.
- 98.Sarmadian F and R.T.Mehrjardi., (2008)" Modeling of some soil properties using artificial neural network and multivariate regression in Gorgan province, north of I ran" *Global Environmental Research*, 2:30-35.
- 99.Sillers, W.S., Fredlund, D.G. and Zakerzadeh, N., (2001)" Mathematical attributes of some soil-water characteristic curve models" *Geotech.Geol.Eng.*19:243-283
- 100.Sillers, W.S., Fredlund, D.G. and Zakerzadeh, N.,(2001)"Mathematical attributes of some soil-water characteristic curve models" *Geotech.Geol.Eng.*19:243-283.
- 101.Sepaskhah A.R., and Bondar H., (2002)" Estimating van Genuchten soil water retention curve from some soil physical properties.*Iran Agric. Res.*, 21:105-118.
- 102.Tomasella, J., Hodnett, G.M and Rossato, L., (2000)" Pedotransfer Functions for the Estimation of Soil Water Retention in Brazilian Soils" *Journal of Soil Sciences. Soc.Am.* 64:327–338.
- 103.Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J. and Darius, P., (1989)" Estimating the soil moisture retention characteristic from texture" bulk density, and carbon content. *Soil Sci.* 148: 389-403.
- 104.Wisconsin, M.,(1986)" *Methods of soil analysis, physical and mineralogical methods*, second edition. American society of Agronomy, Inc. soil science society of America, Inc. publisher. 1188 pages.
- 105.Wosten, JHM and Tamari, S., (1999)" Application of artificial neural networks for developing pedotransfer functions of soil hydraulic parameters" *Assessment of Non-Point Source Pollution in the Vadose Zone*: 235-241.
- 106.Xiangsheng Yi, Guosheg, Li., Yanyu, Yin., (2013)" Comparison of three method to

develop pedotransfer function for the saturated water content and field water capacity in permafrost region" Cold Region Science and Technology. 88: 10-16.

Abstract

Knowing the hydraulics properties of the soil, such as the moisture retention curve, is a prerequisite for modeling water movement and transfer of salts in the soil. Direct method of estimating this feature is costly and time consuming. In this study, moisture retention curve was Obtained 80 soil samples collected from agricultural fields of Shahrood (Bastam). For this purpose, parametric and point pedot transfer functions were developed based on multiple linear regression and artificial neural network. Physical parameters (such as bulk density, particle distribution) and chemical (like organic matter and lime) were measured as inputs of the models in the laboratory. The soil moisture content was measured at the potential of 0, 10, 30, 50, 100, 300, 500, 1000 and 1500 kPa by means of pressure plates. Characteristics of 56 soil samples were considered for developing of models and characteristics of 24 soil samples for validation of the results. The results showed that the Derner model by assigning values of $RMSE = 0/0069$, $GMER = 0/994$ at the agricultural capacity point and values of $RMSE = 0/012$, $GMER = 1/02$ at the point of permanent wilting, the Van Genaghan model with assigning values of $RMSE = 0/0086$, $GMER = 0/976$ at the crop capacity point and values of $0RMSE = 0/024$, $GMER = 1/08$ at the wilting point had the best results and the model of the Campbell by assigning the values of $RMSE = 0/0003$, $GMER = 0/228$ had the weakest performance in the estimation of crop capacity moisture. The results of comparison of MLR and ANN methods in moisture point estimation showed that MLR model with assignment of values $RMSE = 0/087$ and $RMSE = 1/166$ in suction 0.3 and 15 times and ANN model with assignment of $RMSE$ values = $0/076$ and $RMSE = 0/086$, respectively, in suction 0.3 and 15 times with the worst and best performance.

key words: Artificial Neural Network, Pedotransfer Function, Shahrud, Soil moisture retaining curve.



Shahrood University of Technology
Faculty of Agriculture

M.Sc.Thesis in Water Structures Engineering

Prediction of Soil Moisture Retention Curve using Pedotransfer
Function

By:

Fatemeh Dehghani

Supervisors:

Dr. Khalil Azhdari

Dr. Roozbeh moazenzadeh

Advisors:

Dr. vagihe dorostkar

Dr. Mohammad Hadi movahed nezhad

July2019

