

رابطه تجربی بین شاخه خشک و تر منحنی رطوبتی خاک با استفاده از مدل ون گنوختن

مرضیه سادات مهدیان¹ و بیژن قهرمان

دانشجوی سابق کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی دانشگاه فردوسی مشهد؛ mahdian_m87@yahoo.com

استاد گروه آبیاری و زهکشی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد؛ bijangh@um.ac.ir

دریافت: 1391/6/20 و پذیرش: 1392/4/17

چکیده

توضیح کمی منحنی رطوبتی خاک برای مطالعه حرکت آب در بخش غیر اشباع خاک ضروری است. اندازه‌گیری مستقیم رطوبت و پتانسیل ماتریک خاک، مستلزم صرف هزینه و زمان زیاد می‌باشد. افزون بر این به‌علت پدیده پسماند، اندازه‌گیری رطوبتی در شاخه خشک شدن را نمی‌توان برای رسم منحنی در شاخه مرطوب شدن به‌کار برد. بنابراین استفاده از روشی غیر مستقیم برای پیدا کردن رابطه بین دو شاخه منحنی رطوبتی مورد احتیاج می‌باشد. یکی از این روش‌های غیر مستقیم، ایجاد و استفاده از توابع انتقالی خاک می‌باشد. هدف از این پژوهش ارائه توابعی برای برآورد پارامترهای مدل ون گنوختن در شاخه مرطوب شدن منحنی با استفاده از اطلاعات شاخه خشک منحنی رطوبتی می‌باشد. اطلاعات مورد نیاز در این پژوهش از بانک اطلاعاتی خاک Unsoda جمع‌آوری شده است. این اطلاعات شامل داده‌های منحنی رطوبتی در حالت خشک و تر شدن و همچنین وزن مخصوص ظاهری 21 نمونه خاک در سه کلاس بافتی شنی (10 نمونه)، لوم و لوم رسی (7 نمونه) و لوم رس سیلتی (4 نمونه) می‌باشد. برای ایجاد توابع، کل نمونه‌های خاک به‌کار گرفته شد و در مرحله ارزیابی به‌دلیل کم بودن تعداد نمونه‌ها از ارزیابی متقاطع استفاده شد. نتایج نشان داد که پارامتر n_w در مدل ون گنوختن با اطلاعات موجود با دقت خوبی برآورد شده و تابع معرفی شده برای پارامتر a_w از عملکرد پایین‌تری برخوردار بود. مدل ارائه شده برای برآورد پارامترهای مدل ون گنوختن در شاخه مرطوب شدن منحنی رطوبتی، مقدار رطوبت را در پتانسیل‌های کم بهتر برآورد می‌کند. در پتانسیل‌های بالاتر مدل مذکور مقدار رطوبت را کم‌تر از مقدار واقعی برآورد کرد. نتایج مقایسه تابع انتقالی با مدل پسماند پارلانژ، عملکرد بهتر توابع انتقالی را در برآورد منحنی رطوبتی در شاخه مرطوب شدن نشان داد.

واژه‌های کلیدی: پسماند، توابع انتقالی خاک، مدل پارلانژ

مقدمه

گیری‌های مستقیم این ویژگی دیده می‌شود این روش‌ها همچنان پرهزینه و زمان بر هستند. افزون بر این به‌علت طبیعت پیچیده فاز مایع در خلل و فرج متوسط غیر اشباع خاک ارتباط بین فشار آب و حجم آب یکنواخت نمی‌باشد که از آن به‌عنوان پدیده پسماند نام برده‌اند

منحنی مشخصه رطوبتی خاک از مشخصه‌های مهم فیزیکی خاک و بیانگر رابطه بین مکش ماتریک و رطوبت خاک است و در مسائل آب و خاک مانند آبیاری و زهکشی، حفاظت خاک، حرکت مواد آلاینده در خاک، مدل سازی جریان آب در خاک از اهمیت زیادی برخوردار است. با وجود پیشرفت‌هایی که در اندازه

¹ نویسنده مسئول، آدرس: گروه آبیاری و زهکشی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد. کدپستی: 9177948974

آورده شده است. هرچند که این نسخه از معادله پارلانژ باید در خاک‌های بیش‌تری مورد آزمون قرار گیرد.

در سال‌های اخیر، روش‌های غیر مستقیم برای برآورد منحنی مشخصه رطوبتی مورد توجه پژوهشگران علوم خاک و آب قرار گرفته است. توابع انتقالی خاک، یکی از این روش‌هاست که ویژگی‌های دیریافت خاک را از روی ویژگی‌های زودیافت آن برآورد می‌کند. توابع انتقالی اولین بار توسط بثوما (1989) پیشنهاد و در مسائل مربوط به فیزیک خاک به‌کار گرفته شدند. وی توابع انتقالی را به‌صورت ترجمه داده‌هایی که داریم به داده‌هایی که نیاز داریم بیان کرد. تلاش‌های متعددی برای برآورد منحنی رطوبتی به‌طریقه غیرمستقیم صورت پذیرفته که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به مطالعات بروکس و کوری (1964)، کمپل (1974) و ساکستون و همکاران (1986) و هاورکمپ و پارلانژ (1986) اشاره نمود. توابع انتقالی برآورد کننده منحنی نگهداشت رطوبتی را می‌توان در سه دسته کلی جای داد.

دسته اول توابع انتقالی فیزیکی - تجربی هستند که منحنی نگهداشت رطوبتی را صرفاً از روی خواص فیزیکی خاک مشتق می‌کنند. مدل آریا و پاریس (1981) یکی از توابع این گروه است که پژوهشگران زیادی همچون هاورکمپ و پارلانژ (1986) آن‌را ارزیابی کرده‌اند. نتایج این مطالعات نشان داد که این تابع، منحنی رطوبتی خاک‌های شنی را به‌خوبی برآورد می‌کند اما برای خاک‌های لومی و رسی دقت کافی ندارد. دسته دوم، توابع انتقالی نقطه‌ای هستند که به‌طور معمول مقدار رطوبت را در مکش‌های ماتریک معین برآورد می‌کنند که ترجیحاً دو نقطه ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم برای تعیین مقدار آب قابل استفاده گیاه می‌باشد. مهم‌ترین کاستی این نوع از توابع انتقالی آن است که برای تعیین منحنی مشخصه رطوبتی به تعداد زیادی معادله رگرسیونی نیاز است. به همین دلیل، استفاده از این‌گونه توابع در مدل‌های شبیه‌ساز مشکل است. توابعی که گوپتا و لارسون، رالز و براکن‌زیک (1982)، و آهوچا و همکاران (1984) پیشنهاد کرده‌اند، در گروه توابع انتقالی نقطه‌ای قرار می‌گیرند. دسته سوم، توابع انتقالی پارامتریک می‌باشند. در این روش، ابتدا فرض می‌شود که رابطه بین مقدار رطوبت و مکش ماتریک بر اساس یک مدل منحنی مشخصه رطوبتی خاص مانند مدل ون گنوختن (1980) که تعداد معینی پارامتر دارد، قابل توصیف است. سپس با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه یا شبکه عصبی مصنوعی پارامترهای آن برآورد می‌شود. این توابع برخلاف توابع نقطه‌ای، پارامترهای مربوط به منحنی مشخصه رطوبتی و

(هینز، 1930؛ پولوواسیلیس، 1961؛ تاپ و میلر، 1966؛ دیو و ویرنگا، 1975). پسماند و توصیف فیزیکی آن ابتدا در سال 1962 میلادی توسط پولوواسیلیس¹ ارائه گردید. دلایلی که اثر پسماند را به‌وجود می‌آورند زیاد است که از جمله می‌توان به غیر یکنواخت بودن منافذ خاک از نظر اندازه و شکل، زاویه تماس و شعاع هلال آب در داخل لوله‌های موئین، وجود لوله‌های ته‌بسته و محبوس شدن هوا در خاک و انبساط و انقباض ساختمان خاک اشاره کرد (علیزاده، 1386). در گذشته عموماً پدیده پسماند در فیزیک خاک نادیده گرفته می‌شد. این موضوع ممکن است در خشک یا مرطوب شدن یکنواخت (به‌ترتیب فرآیندهای تبخیر و نفوذ) قابل قبول باشد، اما در مواردی که مرطوب شدن یا خشک شدن به‌طور همزمان یا پی‌درپی در قسمت‌هایی از خاک رخ اتفاق می‌افتد (توزیع مجدد)، پدیده پسماند از اهمیت زیادی برخوردار می‌گردد (آهوچا و همکاران، 1984).

تاکنون مدل‌های مختلفی برای توصیف پسماند در منحنی رطوبتی ارائه شده است که شامل دو گروه اصلی مدل‌های مفهومی و مدل‌های تجربی می‌باشد. گروه اول بر مبنای نظریه پسماند موئینه‌ای و گروه دوم بر مبنای تحلیل شکل و خصوصیات منحنی رطوبتی می‌باشد. مدل‌های مفهومی شامل نظریه حوزه مستقل، نظریه حوزه وابسته و مدل پارلانژ و مدل‌های تجربی شامل مدل‌های درون‌یابی، خطی و شیب می‌باشند (آهوچا و همکاران، 1984). ایزدی و همکاران (2009) مدل‌های مختلف پسماند را بررسی کرده و مدل پارلانژ را بهترین مدل برای پیش‌بینی پسماند در منحنی رطوبتی نتیجه‌گیری کردند. مقصود و همکاران (2004) در مقایسه مدل‌های مختلف پسماند به این نتیجه رسیدند که مدل عمومی معلم نمی‌تواند به‌طور کامل منحنی رطوبتی خاک را در شاخه خشک شدن برآورد کند، در صورتی‌که مدل پارلانژ (برداک و همکاران، 2001) برآورد بهتری از منحنی اصلی خشک شدن با استفاده از اطلاعات منحنی مرطوب شدن نشان داد. برداک و همکاران (2001) مدل پارلانژ را مجدداً با استفاده از مدل ون گنوختن (1980) به‌جای معادله بروکس و کوری (1964) فرمول‌بندی کردند.

زمانی‌که معادله ون گنوختن با استفاده از شاخه اصلی منحنی خشک شدن تشکیل شود، مدل پارلانژ معادلات مختلفی را برای توصیف منحنی اصلی مرطوب شدن ارائه می‌دهد. معادلاتی هم برای برآورد منحنی خشک شدن از روی اطلاعات منحنی مرطوب شدن اصلی در این تحقیق

¹ Poulouvassilis

اطلاعات جمع آوری شده مورد استفاده در این تحقیق شامل داده‌های منحنی رطوبتی در حالت خشک شدن و تر شدن و نیز چگالی ظاهری خاک می‌باشد. در جدول شماره 1 اطلاعات مربوط به خاک‌های مورد مطالعه آورده شده است. دامنه تغییرات جرم ویژه ظاهری در نمونه‌های سبک بافت از دیگر نمونه‌ها بیش تر و از 1/179 تا 1/181 گرم بر سانتی متر مکعب می‌باشد.

پس از استخراج داده‌های مورد نیاز، پارامترهای معادله ون‌گونختن در شاخه خشک و تر با استفاده از برنامه رایانه‌ای RETC تعیین شدند. مدل مشخصه رطوبتی ون‌گونختن (1980) از رایج ترین مدل‌های منحنی مشخصه رطوبتی است که به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد:

(1)

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

که در آن، n ، m ، α پارامترهای شکل هستند.

در جدول شماره 2 محدوده پارامترهای معادله ون‌گونختن در شاخه خشک و تر شدن آورده شده است. با توجه به سطح ویژه بالای ذرات رس، مقدار رطوبت باقی مانده یا θ_r در خاک های سنگین بافت بیش تر از خاک های میان بافت است که این امر در جدول شماره 2 به‌خوبی نمایان است. در مرحله بعد به منظور تعیین نوع معادلات، همبستگی‌های خطی بین مقادیر ضرایب معادله ون‌گونختن در شاخه خشک شدن به‌عنوان متغیرهای مستقل و ضرایب n و α در شاخه تر شدن منحنی به‌عنوان متغیرهای وابسته به‌دست آمد. ضرایب همبستگی بین این متغیرها در جدول شماره 3 ارائه شده است.

پردازش داده‌ها

غیر نرمال بودن توزیع داده ها، آزمون‌های فرضیه را نامعتبر می‌سازد. زیرا، این آزمون‌ها بر فرض نرمال بودن داده‌ها استوار هستند (قربانی دشتکی و همکاران، 1381). با توجه به این مهم، ابتدا چگونگی توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون نرمال بودن¹ و به کمک نرم افزار آماری Minitab مورد بررسی قرار گرفت. این آزمون توزیع پارامترهای α_w ، n_w ، n_d را غیر نرمال نشان داد. با استفاده از تبدیل باکس-کاکس، توزیع داده‌ها نرمال شدند.

هدایت هیدرولیکی را برآورد می‌کنند و از این رو تمام دامنه تغییرات منحنی‌های مربوط را تخمین می‌زنند. توابع به دست آمده در این تحقیق در این دسته جای می‌گیرد.

هاونگ و ژنگ (2005)، با استفاده از توزیع اندازه ذرات به عنوان داده‌های زودیافت و توابع انتقالی رگرسیونی خطی توانستند مشخصات منحنی رطوبتی را به‌خوبی تخمین بزنند. نمس و رالز (2005) نیز با استفاده از توزیع اندازه ذرات توانستند به تخمینی قابل قبول از منحنی رطوبتی خاک دست یابند. تومسلا و همکاران (2000) نیز از توابع انتقالی رگرسیونی برای برآورد پارامترهای معادله منحنی رطوبتی خاک‌های برزیل استفاده کرده و دریافتند این توابع در مقایسه با توابع انتقالی که به‌طور عمومی در مورد کلیه خاک‌های مناطق گرمسیر مورد استفاده قرار می‌گیرند دارای خطای کم‌تری هستند. خداوردیلو و همایی (1381) در پژوهشی روی 27 نمونه خاک سری کرج با بافت لوم نشان دادند که توابع انتقالی خاک در برآورد نقطه‌ای منحنی رطوبتی خاک کارایی خوبی دارند. نتایج مطالعات هادنت و تومسلا (2002) قربانی و همایی (1381) و هیولمنز و همکاران (2005) تأیید می‌کنند که توابع انتقالی رگرسیونی روش مناسبی برای مدل‌سازی خصوصیات هیدرولیکی خاک هستند. در هیچ تحقیقی تاکنون از مفهوم توابع انتقالی برای ایجاد منحنی رطوبتی در شاخه خشک و تر استفاده نشده است. هدف از این تحقیق، استفاده از کاربرد توابع انتقالی برای برآورد منحنی مشخصه رطوبتی در شاخه تر شدن با استفاده از اطلاعات شاخه خشک شدن منحنی و مقایسه آن با مدل پسماند پارلانژ می‌باشد. از آن‌جاکه اندازه‌گیری خصوصیات منحنی رطوبتی در هر دو شاخه نیاز به زمان و هزینه‌های فراوان دارد استفاده از این روش می‌تواند یک راه حل عمده در صرفه-جویی زمان و هزینه باشد.

مواد و روش‌ها

اطلاعات مورد نیاز این تحقیق از بانک خاک unsoda جمع‌آوری شده است. این بانک شامل اطلاعاتی از قبیل خصوصیات هیدرولیکی خاک غیر اشباع (منحنی رطوبتی، هدایت هیدرولیکی و پخشیدگی آب خاک)، مشخصات اصلی خاک (توزیع اندازه ذرات، چگالی ظاهری، مقدار مواد آلی خاک) و اطلاعات تکمیلی وابسته به نوع خاک و روش‌های آزمایشگاهی می‌باشد. اطلاعات موجود در این بانک توسط سرویس تحقیقات کشاورزی سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده جمع‌آوری شده و استفاده از آن برای تمامی محققین رایگان می‌باشد (www.ars.unsoda.gov/services/soft).

¹ Normality Test

$$\left[\left((n-1)^{-1} \sum_1^n [\ln(\varepsilon_i) - \ln(GMER)]^2 \right)^{1/2} \right] \quad (6)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\theta_{pre}}{\theta_{mea}} \quad (7)$$

در این روابط، θ_{mea} و θ_{pre} به ترتیب بیانگر مقادیر اندازه و برآورد شده، ε_i نسبت خطا و n تعداد کل مشاهدات می باشد. بهترین مدل، مدلی است که کمترین مقادیر **RMSE** و **ME** (مقادیر نزدیک به صفر) را داشته باشد. **GMER** مساوی یک نشان دهنده تطابق کامل بین داده های برآورد شده و اندازه گیری شده، **GMER** کوچک تر از یک نشان دهنده برآوردهای کم تر از مقادیر اندازه گیری شده و **GMER** بزرگ تر از یک نشان دهنده برآوردهای بیش تر از مقادیر اندازه گیری شده می باشد. **GSDER** برابر یک نیز نشان دهنده تطابق کامل مقادیر برآورد شده با مقادیر اندازه گیری شده است. با افزایش خطای برآورد، **GSDER** افزایش می یابد.

مدل پارلانژ

براداک و همکاران (2001) مدل پارلانژ را مجدداً با استفاده از مدل ون گنوختن به جای معادله بروکس و کوری فرمول بندی کردند. زمانی که معادله ون گنوختن با استفاده از اطلاعات شاخه اصلی منحنی خشک شدن تشکیل شود، با استفاده از این مدل می توان شاخه اصلی مرطوب شدن منحنی را ترسیم کرد.

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (8)$$

$$\theta_{w,0} = -\theta_s ah + \theta_s \left[1 + (ah)^n \right]^{1/n} \quad (9)$$

$$\theta_{w,0} = \theta_s \left[\frac{(1 + (ah)^n)^{1/n} \{n-1 + (ah)^n / (1 + (ah)^n)\}}{[n-1]} - ah \right] \quad (10)$$

که در آن $\theta_{w,0}$ رطوبت در شاخه اصلی منحنی مرطوب شدن و α ، n و m پارامترهای مدل ون گنوختن در شاخه اصلی خشک شدن می باشد (براداک و همکاران، 2001). در این قسمت به منظور مقایسه مدل به دست آمده با دیگر روابط، رطوبت در شاخه مرطوب شدن منحنی با استفاده از مدل پارلانژ برآورد شده، نتایج آن با تابع انتقالی به دست آمده و با داده های اندازه گیری شده مقایسه گردید.

نتایج و بحث

بررسی همبستگی های ساده بین متغیرهای بیان شده (جدول شماره 3) نشان می دهد که هر یک از متغیرهای وابسته با بیش از یک متغیر مستقل، همبستگی معنی داری دارد. بنابراین به نظر می رسد استفاده از یک مدل چندمتغیره که برآوردی دقیق تر ارائه دهد ضرورت دارد. جدول شماره 4 بهترین توابع به دست آمده را نشان

$$\alpha_w^* = \frac{1}{\sqrt{\alpha_w}} \quad n_d^* = \frac{1}{\sqrt{n_d}} \quad n_w^* = \frac{1}{n_w}$$

در رگرسیون خطی چندگانه، اگر بین متغیرهای مستقل وابستگی خطی قوی مشاهده شود همراستایی چندگانه به وجود می آید. وجود همراستایی چندگانه دشواری هایی همچون افزایش خطا در اثر گرد کردن داده های به دست آمده و محاسبه شده را به وجود آورده و تفسیر ضرایب رگرسیون جزء را با تناقض روبه رو می کند. در آزمون همبستگی بین متغیرها بیش ترین همبستگی بین θ و B_d مشاهده شد. برای جلوگیری از همراستایی در توابع به دست آمده، این دو متغیر همزمان در یک تابع استفاده نشدند.

ایجاد توابع انتقالی شاخه تر شدن منحنی رطوبتی

به منظور ایجاد توابع انتقالی پارامترهای مدل ون گنوختن در شاخه خشک شدن و چگالی ظاهری خاک (B_d) به عنوان متغیرهای برآورد کننده در نظر گرفته شدند.

با استفاده از معادلات رگرسیون چند متغیره خطی، بهترین معادلات برای برآورد ضرایب معادله ون گنوختن در شاخه تر شدن منحنی رطوبتی انتخاب شدند. در این تحقیق فرض شد که θ_r ، θ_s در هر دو شاخه خشک و تر شدن منحنی با هم برابر می باشند.

ارزیابی توابع

در ارزیابی توابع به دلیل کم بودن تعداد نمونه ها، از ارزیابی مقاطع استفاده شد. برای این منظور در هر مرحله از آزمون یک نمونه خاک حذف و با 20 نمونه باقی مانده خاک ها، توابع ارزیابی شدند. در آخر، میانگینی از نتایج مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از توابع ارایه شده رطوبت در مکش های 1، 10، 50، 100 و 300 سانتی متر در شاخه مرطوب شدن منحنی رطوبتی و پارامترهای معادله ون گنوختن در همین شاخه (α_w^* ، n_w^*) برآورد شدند. سپس پارامترهای آماری **RMSE** (ریشه میانگین مربعات خطا)، **MAE** (میانگین خطای مطلق) و **GMER** (میانگین هندسی نسبت خطا) و **GSDER** (نسبت خطای انحراف استاندارد هندسی) برای ارزیابی اعتبار توابع استفاده شدند.

$$RMSE = \left[n^{-1} \sum_1^n (\phi_{pre} - \phi_{mea})^2 \right]^{0.5} \quad (3)$$

$$ME = \left[n^{-1} \sum_1^n (\phi_{mea} - \phi_{pre}) \right] \quad (4)$$

$$GMER = \exp \left[n^{-1} \sum_1^n \ln(\varepsilon_i) \right] \quad (5)$$

برای درک بهتر عملکرد تابع انتقالی تعریف شده در برآورد رطوبت خاک در شاخه تر شدن و مقایسه آن با مدل پارلانژ، منحنی رطوبتی خاک در خاک‌هایی با بافت مختلف ترسیم شد (شکل‌های 8 و 9). همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود در سه کلاس بافتی سبک، سنگین و متوسط میزان رطوبت در پتانسیل‌های 10 تا 100 سانتی متر به‌خوبی برآورد شده است. در مکش‌های بالاتر به دلیل نبود مقادیر اندازه‌گیری شده، کارایی مدل‌ها ضعیف بود. نتایج در بافت لوم و لوم سیلت که در طبقه‌بندی خاک‌های با بافت متوسط قرار گرفته بودند نشان می‌دهد که تابع انتقالی تعریف شده در خاک‌های بافتی متوسط از عملکرد بسیار خوبی برخوردار بوده است. مدل پسماند از لحاظ شکل منحنی رطوبتی با داده‌های اندازه‌گیری برآورد بسیار خوبی را نشان می‌دهد اما در تمامی بافت‌ها برآورد کم‌تری در میزان رطوبت را نشان داده است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق عملکرد تابع انتقالی و مدل پارلانژ در برآورد میزان رطوبت در شاخه اصلی تر شدن منحنی رطوبتی با استفاده از اطلاعات شاخه خشک شدن منحنی ارزیابی شد. نتایج به‌دست آمده از تابع انتقالی معرفی شده در این تحقیق مناسب‌تر از مدل پارلانژ بود. عملکرد بهتر تابع انتقالی به‌خصوص در کلاس بافتی لوم و شن مشاهده گردید که علت آن می‌تواند تعداد نمونه‌های بیشتر در این دو کلاس بافتی برای ایجاد توابع باشد. مدل پارلانژ از لحاظ شکل منحنی رطوبتی نتایج بهتری را از خود نشان داد. ضمناً برای اولین بار از مفهوم توابع انتقالی در این زمینه استفاده شد که با اطلاعات بیشتر از خاک، می‌توان توابع دقیق‌تری را به‌دست آورد.

می‌دهد. بررسی این توابع نشان می‌دهد که θ_{sd} و α_d بیش‌ترین سهم را در برآورد α_w^* داشته است.

مقایسه مقادیر ضریب تبیین تعدیل شده توابع در جدول شماره 4 نشان می‌دهد که تابع انتقالی تعریف شده برای پارامتر n_w در مدل ون‌گنوختن با اطلاعات موجود برآوردی بهتر داشته ولی تابع به‌دست آمده برای پارامتر α_w از عملکرد پایین‌تری برخوردار بوده است.

نتایج به‌دست آمده (جدول شماره 5) حاکی از آن است که مدل معرفی شده برای برآورد پارامترهای مدل ون‌گنوختن در شاخه مرطوب شدن، در پتانسیل‌های کم رطوبت را بهتر برآورد کرده است. با افزایش پتانسیل ماتریک خاک علاوه بر این که میزان برآورد کم‌تر از مقدار اندازه‌گیری شده است (کاهش مقدار GMER)، خطای اندازه‌گیری نیز افزایش پیدا کرده است (افزایش مقدار GSDER). در پتانسیل‌های بالاتر، مدل مذکور مقدار رطوبت را کم‌تر از مقدار واقعی برآورد می‌کند.

در شکل‌های شماره 6 و 7 رطوبت‌های برآورد شده توسط تابع انتقالی و اندازه‌گیری شده در شاخه تر شدن و نیز مقادیر رطوبت با استفاده از مدل پارلانژ و مقادیر اندازه‌گیری شده در پتانسیل‌های مختلف مقایسه شده است. مقدار R^2 در این نمودارها مشخص می‌کند که تابع انتقالی در پتانسیل‌های 1، 10، 50 و 100 سانتی‌متر بهترین برآورد میزان رطوبت را داشته است. در پتانسیل ماتریک 300 سانتی‌متر همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده رطوبت به کم‌ترین مقدار و حدود 0/48 رسیده است. مقایسه بین مدل پارلانژ و تابع انتقالی با مقادیر اندازه‌گیری شده گویای عملکرد بهتر تابع انتقالی در برآورد منحنی رطوبتی در شاخه مرطوب شدن می‌باشد.

جدول 1- محدوده داده‌های مورد مطالعه

چگالی ظاهری (گرم بر سانتیمتر مکعب)	تعداد نمونه‌ها	نوع خاک
1/179-1/81	10	سبک بافت*
1/17-1/32	7	میان بافت**
0/724-1/28	4	سنگین بافت***
0/724-1/81	21	مجموع

* سبک بافت: شنی، میان بافت: لوم و لوم رسی، سنگین بافت: لوم رسی سیلتی

جدول 2- محدوده پارامترهای معادله ون گنوختن در شاخه خشک و تر شدن منحنی رطوبتی (اعداد داخل پرانتز مربوط به شاخه تر شدن می باشد)

n (-)	α (1/cm)	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)	بافت خاک
1/47-10/26 (1/28-7/98)	0/007-0/424 (0/015-0/219)	0/166-0/468 (0/247-0/455)	0-0/115 (0-0/078)	سبک بافت میان بافت سنگین بافت
1/30-1/65 (1/22-1/55)	0/0074-0/091 (0/016-0/08)	0/390-0/538 (0/393-0/495)	0-0/142 (0-0/12)	
1/04-5/94 (1/04-1/62)	0/015-0/093 (0/027-1/65)	0/323-0/649 (0/390-0/710)	0-0/505 (0-0/50)	

جدول 3- ضرایب همبستگی ساده بین متغیرهای مستقل و ضرائب n و α در شاخه مرطوب شدن منحنی به عنوان متغیرهای وابسته

Bd	θ_{sd}	θ_{rd}	n_d	α_d	متغیر مستقل متغیر وابسته
0/327*	-0/116 ^{ns}	-0/002 ^{ns}	-0/149 ^{ns}	0/769**	α_w
-0/877**	0/747**	0/254 ^{ns}	0/904**	0/178 ^{ns}	n_w

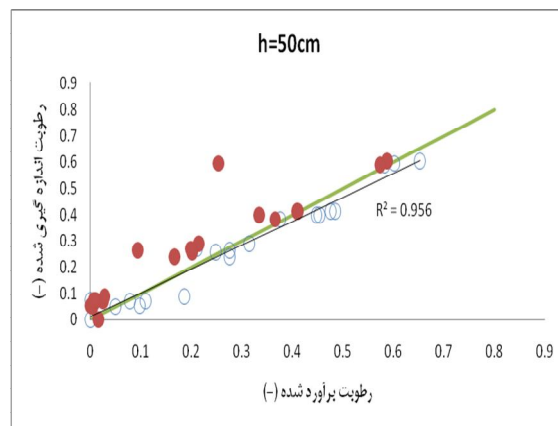
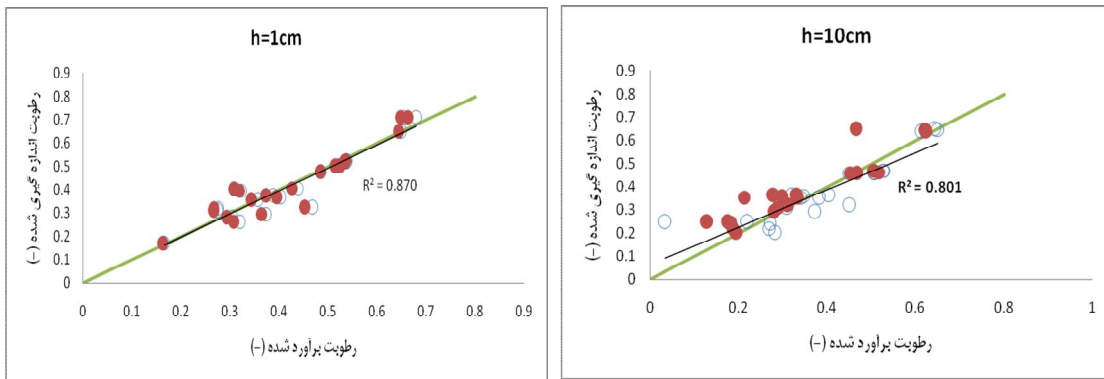
ns, * و ** به ترتیب بیانگر معنی دار نبودن و معنی دار بودن در سطوح 5 و 1 درصد.

جدول 4- توابع انتقالی به دست آمده برای برآورد ضرائب مدل ون گنوختن در شاخه مرطوب شدن منحنی رطوبتی

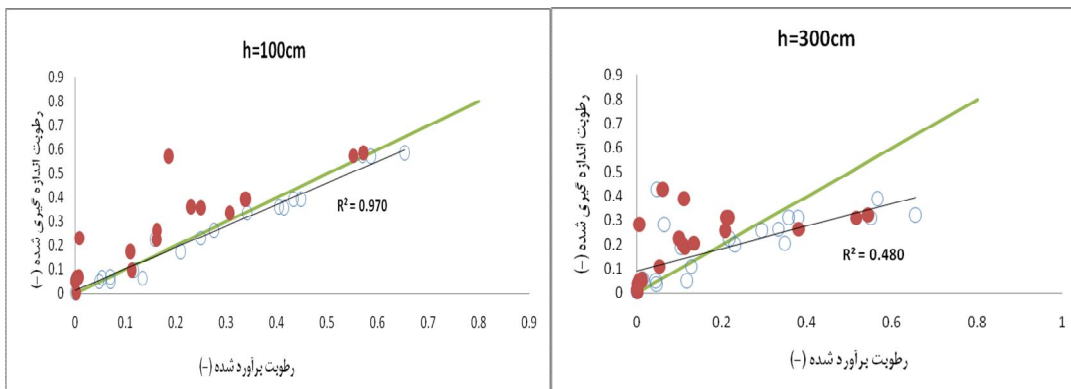
پارامتر	تابع	R ²	R ² _{adj}
n_w^*	$-0.39\theta_{rd} - 3.17\alpha_d - 0.68Bd + 0.57n_d^* + 1.22$	0/93	0/915
α_w^*	$-20.27 + \frac{11.8}{\theta_{sd}} + \frac{1.54}{\alpha_d} + \frac{1.18}{\theta_{sd}^2} - \frac{2.81}{\alpha_d^2} - \frac{1.1}{\theta_{sd} \times \alpha} - \frac{0.92}{\theta_{sd}^3}$ $+ \frac{1.103}{\theta_{sd} \times \alpha_d^2} + \frac{0.22}{\theta_{sd}^2 \times \alpha_d}$	0/94	0/895

جدول 5- نتایج اعتبارسنجی توابع تعریف شده

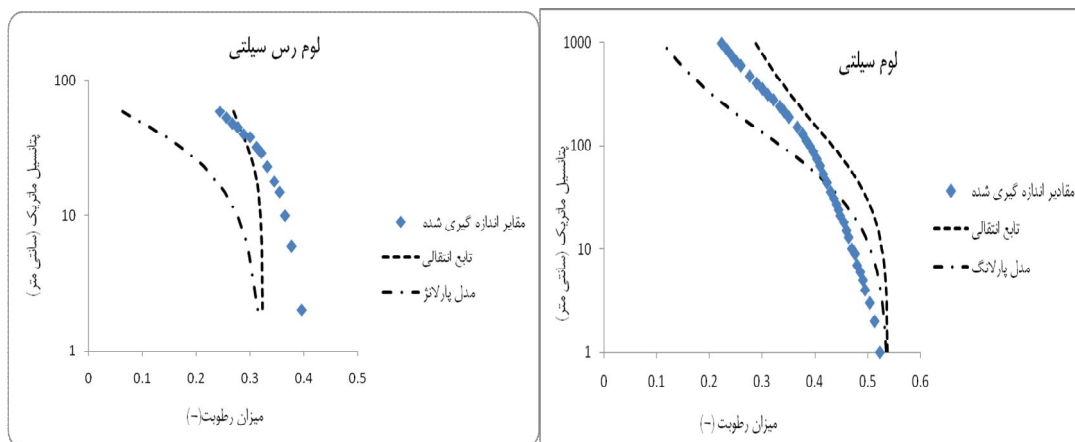
GSDER	GMER	ME	RMSE	متغیر وابسته
1/328	1/019	0/054	0/078	n_w^*
1/096	1/023	0/326	0/428	α_w^*
1/152	1/013	0/038	0/051	θ_{1cm}
1/611	0/92	0/047	0/067	θ_{10cm}
2/13	0/83	0/036	0/046	θ_{50cm}
2/42	0/75	0/032	0/041	θ_{100cm}
3/67	0/34	0/095	0/145	θ_{300cm}



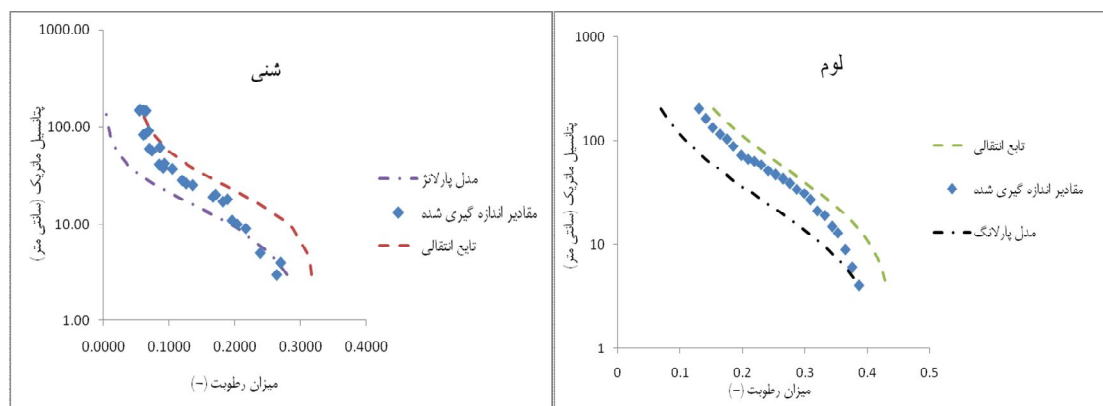
شکل 6- رطوبت‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شده در شاخه مرطوب شدن منحنی رطوبتی با استفاده از توابع انتقالی (دایره تو خالی) و مدل پارلانژ (دایره توپر) برای پتانسیل‌های ماتریک 1، 10 و 50 سانتی‌متر



شکل 7- رطوبت‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شده در شاخه مرطوب شدن منحنی رطوبتی با استفاده از توابع انتقالی (دایره تو خالی) و مدل پارلانژ (دایره توپر) برای پتانسیل‌های ماتریک 100 و 300 سانتی‌متر



شکل 8- منحنی نگهداشت رطوبتی در شاخه تر شدن با استفاده از مقادیر اندازه گیری شده، مدل پارلانژ و توابع انتقالی در خاک‌هایی با بافت مختلف



شکل 9- منحنی نگهداشت رطوبتی در شاخه تر شدن با استفاده از مقادیر اندازه گیری شده، مدل پارلانژ و توابع انتقالی در خاک‌هایی با بافت مختلف

فهرست منابع:

1. خداوردیلو، حبیب و همایی، مهدی، 1381، اشتقاق توابع انتقالی خاک به منظور بر آورد منحنی رطوبتی، مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، شماره 11، ص 36-46.
2. علیزاده، امین. 1386. فیزیک خاک. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.
3. قربانی دشتکی، شجاع و همایی، مهدی. 1381. برآورد پارامتریک توابع هیدرولیکی بخش غیر اشباع خاک با استفاده از توابع انتقالی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، شماره 12، ص 1-16.
4. Ahuja L.R., Nasy J.W., and Williams R.D. 1984. Scaling to characterize soil water properties and infiltration modeling. Soil Sci. Soc. Am. J. 48:970-973.
5. Braddock, R. D., J. Y. Parlange, and J. Lee. 2001. Application of a soil water hysteresis model to simple water retention curves. Transport in Porous Media 44:407-420.
6. Brooks, R. H. and A. T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper No. 3. Colorado State University, Fort Collins.
7. Campbell G.S. 1974. A simple method for determining unsaturated hydraulic conductivity from moisture retention data. Soil Sci. 117: 311-314.

8. Dane, J. H. and P. J. Wierenga. 1975. Effect of hysteresis on the prediction of infiltration, redistribution and drainage of water in a layered soil. *J. Hydrology*. 25:229-242
9. Haines, W. 1930. Studies in the physical properties of soil: The hysteresis effect in capillary properties, and the modes of moisture distribution associated therewith. *J. Agric. Sci.* 20:97-116.
10. Haung ,G., and R. Zhang. 2005. Evaluation of soil water retention curve with the pore-solid fractal model. *Geoderma*. 127 :1
11. Haverkamp R., and Parlange J.Y. 1986. Predicting the water- retention curve from particle size distribution. *Soil Sci*. 142:325-339.
12. Heuvelmans, G., B. Muys1 and J. Feyen. 2005 Regionalisation of the parameters of a hydrological model:Comparison of linear regression models with artificial neural nets. *Journal of hydrology*. Article in press.
13. Hodnett, M. G. and Tomasella. J. 2002. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: a new water retention pedotransfer functions developed for tropical soils. *Geoderma*. 108: 155-180.
14. Izady A., Ghahraman B., and Davari K.2009. Hysteresis: Phenomen and Modeling. *Iran Agricultural Research*, 28 :47-64.
15. Maqsood, A., B. Bussière, M. Mbonimpa, and M. Aubertin. 2004. Hysteresis effects on the water retention curve: A comparison between Laboratory results and predictive models. 57th Canadian Geotechnical Conference and 5th Joint CGS/IAH-CNC Conference
16. Poulouvassilis, A. 1961. Hysteresis of pore water: an application of the concept of independent domains. *Soil Sci*. 93:405-412.
17. Rawls, W. J., and Brakensiek, D.L. 1982. Estimation soil water retention from soil water properties. *Trans. ASAE.*, 108 (IR2):166-171.
18. Saxton K.E., Rawls W.J., Romberger J.S., and Papendick R.I. 1986. Estimating generalized soil water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 1031-1036.
19. Tomessla. J., M. G. Hodnett and L. Roseeta.2000 .Pedotransfer functions for estimation of soil water retention in brizilian soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:327-338.
20. Topp, G. C. and E. E. Miller. 1966. Hysteresis moisture characteristics and hydraulic conductivities for glass bead media. *Soil Sci. Am. Proc.* 30:156-162
21. Van Genuchten, M. T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Am. J.* 44:892-898.
22. Wosten J.H.M., Pachepsky Ya.A., and Rawls W.A. 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *J. Hydrol.* 251:123-150.