

تعیین مدل مناسب در تخمین منحنی مشخصه رطوبتی (Swcc) در شرایط مختلف رطوبتی خاک رسی متراکم

منصوره بایرام^۱، امید بهمنی^{۲*}

۱. کارشناسی‌ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان
mansure.bayram@gmail.com

۲. استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۲/۲۲

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۵/۷/۳

چکیده

خاک‌های رسی در محل‌های دفن زباله به صورت متراکم و به منظور کاهش آلودگی کاربرد دارد. با توجه به اینکه غالباً لاینرهای رسی متراکم غیراشباع است، تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی غیراشباع از جمله منحنی رطوبتی ضروری است. در این پژوهش، Swcc خاک رسی در شرایط رطوبتی متفاوت (خشک، بهینه، مرطوب) و تراکم‌های متفاوت (کاهش، استاندارد، اصلاح‌شده) با استفاده از دستگاه صفحات فشاری به دست آمد. سپس، از پنج مدل تانی، نمایی، روسو، فردلاند و زینگ پنج پارامتره و ون‌گنوختن برای تخمین Swcc استفاده شد. پس از انتخاب بهترین مدل، پارامترهای آن به منظور بررسی رفتار خاک رسی بررسی شد. نتایج نشان داد که مدل ون‌گنوختن در نمونه دست‌نخورده و تراکم کاهش‌ی - بهینه داشت. مدل روسو در تراکم اصلاح‌شده - مرطوب و مدل فردلاند و زینگ پنج پارامتره در سایر نمونه‌ها به دلیل R^2 بزرگ‌تر و SSR و RMSE کوچک‌تر بهترین عملکرد و مدل تانی ضعیف‌ترین عملکرد را داشت. مقدار α در مدل فردلاند و زینگ و ون‌گنوختن در تراکم اصلاح‌شده و استاندارد با افزایش رطوبت افزایش یافت، در حالی که در تراکم کاهش‌ی روندی متفاوت داشت. همچنین، مقدار α در تراکم اصلاح‌شده با افزایش رطوبت به مقدار ثابت میل کرد.

کلیدواژه

پارامترهای ثابت، تراکم، خاک رسی، دستگاه صفحات فشار، رطوبت.

۱. سرآغاز

خاکی به دلیل وجود مصالح مناسب در محل‌های دفن پسماند در ایران، همچنین هزینه کمتر نسبت به سایر لاینرها رواج دارد (قاضی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹). یکی از انواع روش‌های دفن زباله شهری، استفاده از محل دفن با کنترل طبیعی است. مبنای اصلی طراحی این نوع محل‌های دفن، براساس حرکت طبیعی شیرابه در لایه زیرین خاک است. در این طراحی‌ها انتظار می‌رود که شیرابه را خاک غیراشباع در زیر محل دفن به طور طبیعی تصفیه کند (عبدلی و قاضی‌زاده، ۱۳۸۸). در واقع، مهم‌ترین بخش محل‌های دفن زباله پوشش رسی متراکم است که برای

رشد روزافزون جمعیت و گسترش شهرها، تبعات محیط‌زیستی فراوانی به دنبال داشته است. یکی از این موارد دفع زباله‌های تولیدشده در محیط‌های شهری است. در طراحی مهندسی محل دفن زباله (خاکچال) مهم‌ترین مسئله جداسازی محیط آلوده و انباشته از شیرابه از محیط خارج با لایه‌های آب‌بند است (EPA, 1993).

انتخاب صحیح و مبتنی بر دانش و قضاوت مهندسی لاینر در کنترل نفوذ شیرابه در بهینه‌کردن اختصاص هزینه‌ها بسیار مؤثر است. در حال حاضر، استفاده از لاینرهای

کاهش اصطکاک و فضای بین ذرات می‌شود. در این حالت، ذرات از پهلو روی هم قرار می‌گیرد و توده‌ای متراکم تشکیل می‌دهد. در نتیجه تراکم‌پذیری خاک بیش‌تر و آسان‌تر انجام می‌شود.

Hughes و همکاران (۲۰۰۵) در بررسی نوع محل دفن زباله و سیستم لاینر دریافتند که رطوبت خاک رسی متراکم موجب افزایش اثر تراکم می‌شود. به همین دلیل، نقش مهمی در کاهش آلودگی محل‌های دفن زباله دارد و هر چه رطوبت بیشتر باشد، میزان آلودگی خاک کمتر می‌شود.

میرزایی و قربانی دشتکی (۱۳۹۴) به بررسی و مقایسه کارایی شاخص‌های ارزیابی مدل‌های منحنی رطوبتی خاک ۷۰ نمونه خاک پرداختند. آن‌ها در تخمین Swcc در مدل‌های گاردنر، ون‌گنوختن، ون‌گنوختن-معلم، پریر و فردلاندر، و خلوصی و همکاران از نرم‌افزار matlab استفاده کردند و دریافتند مدل ون‌گنوختن دقت بالایی در تخمین

Swcc بافت‌های رسی، رس سیلتی و لوم رسی دارد. Too و همکاران (۲۰۱۴)، و بایرام و همکاران (۱۳۹۴) در بررسی ده مدل از جمله مدل‌های فردلاندر و زینگ پنچ پارامتره، ون‌گنوختن، نمایی (Omuto, 2007)، تانی و روسو به تخمین Swcc پرداختند. آن‌ها بیان کردند که مدل‌های پنچ پارامتره از جمله ون‌گنوختن و فردلاندر و زینگ عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد. Fredlund و همکاران (۲۰۱۱) به تخمین مکش از Swcc به وسیله مدل‌های Gardner (۱۹۵۶)، Van Genuchten (۱۹۸۰)، و Brooks و Corey (۱۹۶۴) پرداختند و دریافتند همه مدل‌ها برآزش مناسبی با داده‌های اندازه‌گیری شده داشت. بیات و همکاران (۱۳۹۲)، Leong و Rahardjo (۱۹۹۷)، Nam و همکاران (۲۰۰۹)، و Fredlund و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند که مدل منحنی رطوبتی Fredlund و Xing (۱۹۹۴) در توصیف منحنی رطوبتی خاک دقت بالایی دارد. Cornelis و همکاران (۲۰۰۵) بیان کردند که مدل Van Genuchten (۱۹۸۰) بهترین برآزش را با داده‌های اندازه‌گیری شده ارائه می‌دهد.

جلوگیری از نشت شیرابه به محیط خارج کاربرد دارد (اسمعیلی و فخاریان، ۱۳۸۳).

همچنین، به منظور مدلسازی جریان و به دلیل اینکه غالباً لاینرهای رسی متراکم غیراشباع است، داشتن اطلاعاتی در مورد ویژگی‌های هیدرولیکی غیراشباع خاک ضروری است (Wang & Benson, 1995). یکی از ویژگی‌های ضروری Swcc است که در پیش‌بینی بهتر عملکرد خاک به عنوان پوشش کاربرد دارد. Swcc یکی از موارد اساسی در توصیف رفتار اشباع و غیراشباع خاک است (Miller et al., 2002).

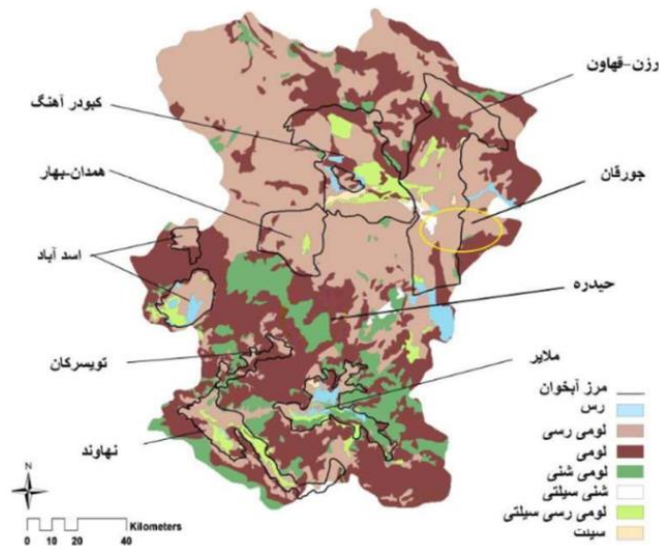
Osinubi و Bello (۲۰۱۱) دریافتند که شکل Swcc به ساختار خاک، نوع تراکم و شرایط رطوبتی بستگی دارد. تغییرات در شکل Swcc با تغییرات منافذ متناسب است که در شرایط تراکم رخ می‌دهد. تغییرات Swcc در پارامترهای مدل‌های تخمین Swcc بازتاب دارد.

طبق مطالعات برخی محققان روی کاربرد خاک رسی در پوشش محل دفن زباله آشکار شد که رطوبت خاک تأثیر بسیاری در تراکم دارد و در تراکم در حالت خشک، ساختار ماکرو و در تراکم در حالت بهینه و مرطوب ساختار میکرو مؤثر است (Dieudonne et al., 2013; Osinubi & Bello, 2011; Birl, 2012). همکاران (۲۰۰۰) بیان کردند، هر نوع خاک در مقدار معینی از رطوبت (رطوبت بهینه)، جرم مخصوص ظاهری، فشردگی و تراکم مناسب و مطلوب دارد. در رطوبت‌های کمتر از رطوبت بهینه، اغلب خاک‌ها سفت است، زیرا برای تشکیل لایه دوگانه پخشیده ذرات رس رطوبت خاک کافی نیست و عمل تراکم‌پذیری با دشواری صورت می‌گیرد. لایه دوگانه پخشیده، طبق نظریه گوی-چاپمن، عبارت است از کاتیون‌های اطراف ذره به آن نمی‌چسبد و به صورت پخشیده اطراف آن قرار دارد، به طوری که هر چه از سطح ذره دور شویم، غلظت کاتیون‌ها کاهش می‌یابد. هنگامی که رطوبت خاک بیش از رطوبت بهینه باشد، ضخامت لایه دوگانه پخشیده افزایش می‌یابد که باعث

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. منطقه مورد مطالعه

خاک مورد استفاده از منطقه اطراف جاده جورقان همدان (پنج کیلومتری جاده تهران) تهیه شد که در عرض جغرافیایی "۰۰'۳۴°۵۳ شمالی و طول جغرافیایی "۰۰'۴۸°۳۳ شرقی قرارداد (بی‌نام، ۱۳۹۰).



شکل ۱. پراکندگی خاک‌های استان همدان از نظر بافت (قائم‌زاده و همکاران، ۱۳۹۳) و مناطق مورد مطالعه در این تحقیق

۳.۲. پلاستیسیته خاک

پلاستیسیته PI میزان شکل‌پذیری خاک است و میزان مکش در درجه اشباع تا حد زیادی به سطح مخصوص ذرات بستگی دارد. از طرفی، پلاستیسیته نشانه مناسبی برای بیان میزان سطح ذرات خاک است. حد روانی به روش کاساگراند و حد خمیری به روش فتیله تعیین شد (۹۸-ASTM D ۴۳۱۸، ۲۰۰۰). پلاستیسیته خاک مورد مطالعه از رابطه (۱) محاسبه شد (جدول ۱).

$$PI = LL - PL \quad (1)$$

در رابطه فوق LL حد روانی، PL حد خمیری و PI پلاستیسیته خاک است.

۲.۲. نمونه‌برداری خاک

نمونه دست‌نخورده از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری با سیلندر برداشت شد. برای حفظ رطوبت و جلوگیری از ریزش خاک، سیلندر در داخل نایلون پلاستیکی قرار گرفت و به آزمایشگاه منتقل شد. درصد اجزای تشکیل‌دهنده خاک (شن، سیلت، رس) به روش هیدرومتری بر پایه قانون استوکز اندازه‌گیری شد (ASTM D۴۲۲). بافت خاک با استفاده از نرم‌افزار TAL4.2 تحت ویندوز و بر اساس سیستم طبقه‌بندی وزارت کشاورزی آمریکا و مثلث بافت خاک (USDA) تعیین شد. مشخصات بافت خاک در جدول ۱ ارائه شده است.

هدف از این پژوهش تخمین منحنی Swcc از طریق برآزش مدل‌های تانی (Tani, 1982)، نمایی (Omuto, 2007)، روسو (Russo, 1988)، فردلانند و زینگ پنج پارامتره (FX5) (Fredlund & Xing, 1988)، ون‌گنوختن (VG) (Van Genuchten, 1980) و تعیین ضرایب آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار Matlab و در نتیجه انتخاب بهترین مدل و بررسی رفتار خاک رسی متراکم است.

جدول ۱. مشخصات خاک مورد مطالعه

رسی	نوع خاک	
۷۰/۳۵	رس٪	آنالیز اندازه خاک
۱۳/۴	سیلت٪	
۱۶/۲۵	شن٪	
۳۷/۱۲	LL	حدود اتربرگ
۲۰/۷۹	PI	

۴.۲. تراکم خاک

تراکم، درصد رطوبت اولیه خاک باید بین ۳ تا ۵ درصد باشد. بعد از انجام تراکم، برای دفعات بعدی به اندازه ۲ درصد وزن خاک، آب به آن اضافه شد. پس از افزودن آب، خاک کاملاً مخلوط شد تا رطوبت به طور کامل برای همه خاک‌ها یکسان شود. این آزمایش پنج بار تکرار شد. سپس با رسم منحنی وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت، میزان رطوبت در نقطه حداکثر وزن مخصوص خشک به دست آمد، که این رطوبت، رطوبت بهینه نام دارد. ویژگی‌های خاک‌های متراکم در جدول ۲ ارائه شده است.

آزمایش تراکم در قالبی به حجم ۹۴۴ سانتی‌متر مکعب و با وزن ۲/۵ کیلوگرمی انجام شد که از ارتفاع ۳۰ سانتی‌متری رها گردید. در آزمایش تراکم استاندارد سه لایه خاک به ضخامت ۳/۹ سانتی‌متر و هر لایه خاک با ۲۵ ضربه (ASTM D1۵۵۷) در تراکم کاهشی سه لایه خاک به ضخامت ۳/۹ سانتی‌متر و هر لایه خاک با ۱۵ ضربه (Daniel & Benson, 1990) و در تراکم اصلاح‌شده پنج لایه خاک به ضخامت ۲/۳۴ سانتی‌متر و هر لایه خاک با ۲۵ ضربه (ASTM D۶۹۸) متراکم شد. برای آزمایش

جدول ۲. خصوصیات خاک رسی متراکم

انواع تراکم	کاهشی	استاندارد	اصلاح‌شده
حداکثر وزن مخصوص (kN/m ³)	۱۳/۰۸۵	۱۳/۹۱	۱۴/۵۷
رطوبت بهینه (%)	۲۲/۴۸	۱۶/۳۹	۱۲/۴۶

آزمایشگاه منتقل شد و به مدت ۲۴ ساعت در آون تحت دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و بعد از خشک شدن وزن شد. سپس، جرم مخصوص ظاهری از رابطه (۲) به دست آمد.

$$\rho_b = M_s / V_t \quad (2)$$

که در آن ρ_b جرم مخصوص ظاهری، M_s وزن خاک خشک به کیلوگرم و V_t حجم کل خاک به مترمکعب است. جرم مخصوص ظاهری نمونه‌ها در جدول ۳ آمده است.

پس از محاسبه رطوبت بهینه، تراکم خاک با توجه به این رطوبت تحت سه شرایط رطوبتی و نمونه‌برداری خاک رسی در سه نوع تراکم تحت سه شرایط رطوبتی انجام شد.

۵.۲. جرم مخصوص ظاهری

جرم مخصوص ظاهری برابر با جرم دانه‌های خاک خشک به حجم کل خاک است و به روش سیلندر بر اساس استاندارد ASTM D۳۳۸۵-۰۳ اندازه‌گیری می‌شود. در این روش، نخست ابعاد و وزن سیلندر نمونه‌برداری تعیین و با استفاده از آن نمونه دست‌نخورده برداشت شد. نمونه به

θ_s نمونه‌های اشباع وزن، سپس به مدت ۲۴ ساعت در آن در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک شد. این نمونه‌ها بعد از خشک شدن، مجدداً وزن و θ_s محاسبه شد. برای تعیین مقدار θ_r ، نمونه‌ها در آزمایشگاه تحت درجه حرارت کنترل ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۴۵ درصد برای دوره‌ای سه‌هفته‌ای هواخشک شد. ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۳ آمده است.

۶.۲. آزمایش صفحات فشاری

بر اساس پژوهش Lin و Cerato (۲۰۱۲) و روش پیشنهادی آن‌ها، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت اشباع شد. همچنین، این نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت تحت مکش قرار گرفت و میزان رطوبت در پتانسیل‌های ماتریک kpa ۳۳-، ۱۰۰-، ۳۰۰-، ۵۰۰-، ۱۰۰۰- با دستگاه صفحات فشاری اندازه‌گیری شد. همچنین، به منظور تعیین رطوبت اشباع (θ_s) و رطوبت باقی‌مانده (θ_r) از روش پیشنهادی Miller و همکاران (۲۰۰۲) استفاده شد. برای تعیین مقدار

جدول ۳. ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه

دست‌نخورده	کاهشی		استاندارد		اصلاح‌شده		تراکم			
	مرطوب	بهبه	مرطوب	بهبه	مرطوب	بهبه	خاک	خاک		
θ_r	۴/۳	۴/۲	۴/۱	۴/۴	۴/۳	۴/۱	۴/۸	۴/۷	۴/۵	
θ_s	۷۵/۹	۷۵	۷۴/۹۵	۷۴/۸۹	۷۳/۵۸	۷۳/۴۴	۷۳/۴۱	۷۲/۳۶	۷۲/۲	۷۲/۱۶
ρ_b (gr/cm ³)	۱/۱	۱/۲۸	۱/۳	۱/۳۵	۱/۳۶	۱/۴۲	۱/۴۶	۱/۵۹	۱/۶۲	۱/۸۱

مشخصات و پارامترهای مدل‌های کاربردی در تخمین Swcc مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۴ ارائه شد.

۷.۲. مدل‌های مورد استفاده

در پژوهش حاضر عملکرد تعدادی از مدل‌های سه پارامتری، چهار پارامتری و پنج پارامتری در تخمین Swcc بررسی شد.

جدول ۴. نظریه مدل‌های تخمین منحنی رطوبتی

پارامترها	مدل‌های تخمین منحنی مشخصه رطوبتی خاک	
a, θ_s, θ_r	$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [1 + (ah)e^{-ah}]$	تانی
a, θ_s, θ_r	$\theta(h) = (\theta_r + \theta_s) e^{-ah}$	نمایی
a, n, θ_s, θ_r	$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [1 + 0.5ah] e^{0.5ah}]^{2/(2+n)}$	روسو
$c, b, a, \theta_s, \theta_r$	$\frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{h}{a} \right)^b \right] \right\}^c}$	فردلاند و زینگ پنج پارامتری
$m, a, n, \theta_s, \theta_r$	$\frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{\left[e + \left(\frac{h}{a} \right)^n \right]^m}$	ون‌گنوختن

پارامترهای تجربی است. پارامترهای a, b, c در مدل فردلاند و زینگ نیز به ترتیب شبیه به پارامترهای m و n, a در مدل ون‌گنوختن است. به منظور دستیابی به بهترین پارامترهای هر مدل از

در این روابط θ_r رطوبت باقی‌مانده (cm^3/cm^3)، θ_s رطوبت اشباع (cm^3/cm^3)، ψ پتانسیل ماتریک (cm) و a معکوس پتانسیل ورود هواست. n در مدل روسو شاخص توزیع اندازه منافذ است. در مدل ون‌گنوختن m و a, n

پس از برازش مدل‌های Swcc در خاک‌های مورد مطالعه و بهینه‌سازی به‌وسیله SSR، پارامترهای ثابت حاصل از بهترین برازش مدل‌ها با داده‌های تجربی در جدول ۵ ارائه شد.

روش‌های بهینه‌سازی استفاد شد. روش‌های برازش برای هر نمونه با آنالیز حداقل مربعات غیرخطی و بر اساس روش الگوریتم trust-region و با به‌کارگیری ابزار برازش منحنی در matlab اجرا شد. این روش با تعریف مقدار اولیه رطوبت باقی‌مانده بین ۰ تا ۰/۱ در تمامی مدل‌ها تکرار شد تا بهترین برازش حاصل گردید.

جدول ۵. پارامترهای ثابت حاصل از بهترین برازش مدل‌های Swcc در خاک رسی

تراکم	مدل پارامتر	فردلاند و زینگ پنج پارامتری (۱۹۹۴)									ون‌گنوختن (۱۹۸۰)		
		a (kpa)	b	c	θ_r	θ_s	α (kpa)	n	θ_r	θ_s	m		
دست‌نخورده		۲/۱۷۸	۰/۸۹	۱/۰۹	۰/۰۰۰۸۴	۰/۷۶	۰/۴۶	۰/۲۷	۰/۰۰۰۳۱	۰/۹۹۳	۱/۱۲۷		
مرطوب		۹۲۰۹	۰/۶۲	۴۵/۹	۰/۰۴۰۲	۰/۵۴۵	۲/۳۵۵	۱/۹۰۵	۰/۰۱۴	۰/۸۰۲	۰/۱۲۸		
اصلاح‌شده	بهینه	۲۳۶/۲	۰/۸۹۳	۱۷/۲۶	۰/۰۸۶	۰/۶۴۸	۱/۶۱۲	۱/۸۰۶	$-۵/۸۶ \div ۱۰^{-۱۲}$	۰/۸	۰/۱۲۶		
	خشک	۵۷/۸	۰/۸۳	۵/۷۹۶	۰/۰۹۸	۰/۶۹۷	۱/۱۵۴	۱/۷۶۴	$۲/۰۴ \div ۱۰^{-۵}$	۰/۸۰۱	۰/۱۲۵		
	مرطوب	۲۸۷/۹	۰/۷۱	۱۲/۹۳	۰/۰۲۷	۰/۶۷۵	۰/۷۵۴	۱/۶۷۷	$۷/۴۷ \div ۱۰^{-۶}$	۰/۸۰۲	۰/۱۱		
استاندارد	بهینه	۱۱۵/۳	۹/۰۹	۰/۷۰۸	۰/۰۸۹	۰/۶۹۷	۰/۶۲	۱/۷۵	$۴/۲۳ \div ۱۰^{-۵}$	۰/۸	۰/۱۰۹		
	خشک	۴/۲۵	۳/۸۹	۰/۷۵	۰/۰۶۶	۰/۷۲	۰/۵۷	۱/۸۸۷	$۱/۴۶ \div ۱۰^{-۴}$	۰/۸۰۲	۰/۱۰۸		
	مرطوب	۶۵۲۸	۰/۵۵	۵۸/۷۳	۰/۰۵۹	۰/۵۳	۰/۴۱۷	۲/۰۱۷	$-۲/۴۶ \div ۱۰^{-۶}$	۰/۸	۰/۰۹۱		
کاهشی	بهینه	$۱/۰۰۷ \div ۱۰^{-۴}$	۰/۴۷	۴۳/۶۱	۰/۰۵۵	۰/۵۸	۰/۴۷	۲/۱۷۶	$۱/۷۳ \div ۱۰^{-۶}$	۰/۸۰۲	۰/۰۹۵۵		
	خشک	۱۱/۹۸	۰/۷۸	۳/۰۳۸	۰/۰۵	۰/۷۳۶	۰/۵۲	۲/۳۸۵	$۲/۴۷ \div ۱۰^{-۸}$	۰/۸۰۱	۰/۰۹۸		

تراکم دیگر روندی معکوس مشاهده شد. مقدار α در مدل فردلاند و زینگ به‌طور قابل توجهی بین خاک و شرایط تراکم متنوع است.

در این پژوهش، پارامتر بهینه‌سازی (SSR) و پارامترهای ارزیابی کارایی از جمله RMSE و R^2 با برازش منحنی در matlab به‌دست آمد که در آن مجموع مربع باقیمانده به‌عنوان SSR به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$SSR = \sum_{i=1}^n w_i (\theta_{wi} - \theta_{ci})^2 \quad (۳)$$

در آن w_i عامل وزن، و θ_{wi} و θ_{ci} به‌ترتیب رطوبت اندازه‌گیری شده و محاسبه شده توسط مدل در سطح فشار معین است. عامل وزن در تمام داده‌ها برابر با ۱ است (Leong & Rahardjo, 1997). اگر SSR کمتر از $۱۰^{-۳}$ باشد، مدل ارائه مناسب و قابل قبولی برای داده‌های تجربی دارد

جدول ۵ پارامترهای ثابت مدل‌های Swcc با عملکرد مناسب در خاک رسی را ارائه می‌دهد. مقدار α مدل ون‌گنوختن بین ۰/۴۱۷ تا ۲/۳۵۵ کیلوپاسکال متغیر و در مدل FX5 بین ۴/۲۵ تا $۱/۰۰۷ \times ۱۰^{-۴}$ است. همان‌طور که مقدار α افزایش می‌یابد، مکش ورود هوا کاهش می‌یابد که Miller و همکاران (۲۰۰۲) و Leong و Rahardjo (۱۹۹۷) مقدار α را برای خاک رسی به‌ترتیب در محدوده بین ۳۵۰-۱ و ۲۸۲-۲/۸۲ کیلوپاسکال به‌دست آوردند. با افزایش n، بخش شیب‌دار منحنی بین Ψ^a و زانو تندتر می‌شود. با توجه به نتایج موجود، روند تغییرات n در تراکم اصلاح‌شده نسبت به تراکم کاهشی و استاندارد متفاوت است، به‌طوری که در تراکم اصلاح‌شده، افزایش اثر تراکم موجب افزایش شیب منحنی می‌شود، در حالی که در دو

۰/۸۱۵ تا ۰/۹۸۴ و ۰/۰۹۹ و ۰/۰۸۳۲ تا ۰/۰۰۹۹، در مدل نمایی بین ۰/۹۳۲ تا ۰/۹۹۹۷ و بین ۰/۰۰۲۳ تا ۰/۰۵۰۷، در مدل روسو بین ۰/۶۹ تا ۰/۹۸۷ و ۰/۰۱۱ تا ۰/۰۸۴، در مدل FX5 بین ۰/۹۴۹ تا ۰/۹۸۴ و ۰/۰۵۸ تا ۰/۰۵۱ و در مدل روسو بین ۰/۹۷۵ تا ۰/۹۹۳ و ۰/۰۱۳۱ تا ۰/۰۳ به دست آمد. با توجه به مقادیر SSR، RMSE و R^2 در مدل FX5 و VG بهترین نتایج را در تمام نمونه‌ها ارائه داد و مدل عملکرد بهتری نسبت به مدل VG ارائه داد. در نمونه دست نخورده، مدل VG در تراکم اصلاح شده- بهینه و خشک، مدل FX5 در تراکم اصلاح شده- مرطوب، مدل روسو در تراکم استاندارد، مدل FX5 در تراکم کاهشی- مرطوب و خشک، مدل FX5 در تراکم کاهشی- بهینه و مدل VG به دلیل R^2 بزرگ‌تر و SSR و RMSE کوچک‌تر بهترین عملکرد را ارائه داد. مدل تانی ضعیف‌ترین عملکرد را در مقایسه با سایر مدل‌ها ارائه داد که علت عملکرد نامناسب مدل تانی دارا بودن دو پارامتر برازشی است که بر موقعیت و شکل منحنی اثر دارد. همچنین، غیرقابل تشخیص بودن اثر هر پارامتر به صورت مجزا از هم است (Sillers et al., 2001). به طور کلی، مدل‌های پنج پارامتری عملکرد بهتری ارائه داد که علت آن تعداد پارامترهاست. طبق یافته‌های Too و همکاران (۲۰۱۴)، هر چه تعداد پارامترهای شکل بیشتر باشد، مدل تمایل بیشتری برای اتصال هر چه نزدیک‌تر به نقاط عطف و پایانی منحنی رطوبتی دارد و از این طریق به مدل اجازه می‌دهد که خیلی نزدیک به داده‌های اندازه‌گیری شده عبور کند و برازش بهتری بیابد. از بین مدل‌های پنج پارامتری نیز FX5 بهترین عملکرد را نسبت به سایر مدل‌ها ارائه داد که با نتایج مرادی و همکاران (۱۹۹۳)، اسماعیل نژاد و همکاران (۱۳۹۴)، باقری و زمردیان (۱۳۸۸) و بیات و همکاران (۱۳۹۲) مطابقت دارد. مرادی و همکاران (۱۹۹۳) به برآورد پارامتریکی مدل‌های منحنی نگهداشت رطوبتی VG و FX5 با استفاده از تکنیک‌های محاسباتی نرم در برخی خاک‌های استان خوزستان پرداختند و دریافتند که مدل FX5 دقت بیشتری نسبت به مدل VG دارد. طبق اظهارات Fredlund و

(Zhai & Rahardjo, 2012; Leong & Rahardjo, 1997).

پارامترهای آماری ریشه دوم مربعات خطا (RMSE) و R^2 به صورت زیر است.

$$RMSE = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_i - m_i)^2} \quad (4)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (s_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2} \quad (5)$$

که در آن‌ها m_i مقادیر اندازه‌گیری شده و s_i مقادیر شبیه‌سازی شده، n تعداد مشاهدات، \bar{m} میانگین مقادیر m_i است.

۳. نتایج و بحث

جدول ۶ بهترین و مناسب‌ترین اطلاعات حاصل از برازش مدل‌های برازشی را در خاک رسی ارائه می‌دهد. در نمونه دست نخورده، مدل‌های FX5 و VG دارای SSR کمتر از 10^{-3} است، در حالی که در تراکم اصلاح شده تمام مدل‌ها به جز مدل‌های تانی و روسو در تراکم اصلاح شده- بهینه، مدل‌های نمایی و FX5 در تراکم استاندارد، همچنین مدل VG در تراکم استاندارد- خشک، مدل FX5 در تراکم کاهشی- خشک و مرطوب دارای مقدار SSR کمتر از 10^{-3} است. در تراکم استاندارد- بهینه هیچ مدلی مقدار SSR کمتر از 10^{-3} ندارد. محدوده SSR با مقادیرهای به دست آمده در مطالعات Leong و Rahardjo (۱۹۹۷) و Miller و همکاران (۲۰۰۲) مشابه است (مدل‌های دارای مقادیر SSR بیش از 10^{-3} در تخمین منحنی مشخصه رطوبتی مناسب نیست).

برای محاسبه خطای پیش‌بینی رطوبت هر مدل از شاخص RMSE استفاده شد و با توجه به نتایج جدول ۶، مقادیر RMSE تمامی مدل‌ها به صفر نزدیک بود که عملکرد مناسب مدل‌ها را در شبیه‌سازی نشان می‌دهد. به طور متوسط، خطای پیش‌بینی رطوبت مدل‌های VG، FX5، روسو، نمایی و تانی به ترتیب کمتر از $0.1872 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ، 0.07755 ، 0.2323 و 0.04106 است.

محدوده R^2 و RMSE در مدل تانی به ترتیب بین

(۱۳۸۸) نیز به تخمین منحنی مشخصه و هدایت هیدرولیکی غیراشباع در تراکم‌های مختلف خاک پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل FX5 با دقت نسبتاً بیشتری نسبت به مدل VG منحنی‌های مشخصه رطوبتی را تخمین می‌زند.

Xing (۱۹۹۴) مرتبط کردن دو پارامتر n و m با رابطه خاص $m=(1-1/n)$ در معادله VG سبب کاهش انعطاف‌پذیری مدل VG می‌شود. البته باید توجه داشت مدل FX5 بر دامنه وسیعی از مکش‌ها قابل‌برازش است. باقری و زمردیان

جدول ۶. پارامترهای SSR و ارزیابی کارایی مدل‌های Swcc خاک رسی

نمونه	پارامترها/مدل	تانی	نمایی	روسو	FX5	VG
دست‌نخورده	SSR	۰/۰۲۰۷۷	۷/۷ ÷ ۱۰ ^{-۳}	۰/۰۱۳۹	۷/۷ ÷ ۱۰ ^{-۴}	۷/۵ ÷ ۱۰ ^{-۴}
	\bar{r}	۰/۸۱۵	۰/۹۳۲	۰/۶۹	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳
	RMSE	۰/۰۸۳۲	۰/۰۵۰۷	۰/۰۸۴	۰/۰۲۸	۰/۰۱۹۴
مرطوب	SSR	۲/۹ ÷ ۱۰ ^{-۴}	۲/۶ ÷ ۱۰ ^{-۴}	۲/۴ ÷ ۱۰ ^{-۴}	۹/۴ ÷ ۱۰ ^{-۴}	۴/۷ ÷ ۱۰ ^{-۴}
	\bar{r}	۰/۹۸۴	۰/۹۸۶	۰/۹۸۷	۰/۹۴۹	۰/۹۷۵
	RMSE	۰/۰۰۹۹	۰/۰۰۹۲	۰/۰۱۱	۰/۰۳۱	۰/۰۱۵
تراکم اصلاح‌شده	SSR	۸/۱ ÷ ۱۰ ^{-۴}	۲/۵ ÷ ۱۰ ^{-۴}	۴/۳ ÷ ۱۰ ^{-۴}	۱/۶۵ ÷ ۱۰ ^{-۴}	۵/۱ ÷ ۱۰ ^{-۴}
	\bar{r}	۰/۹۷	۰/۹۹۱	۰/۹۸۵	۰/۹۹۴	۰/۹۸۲
	RMSE	۰/۰۱۶۵	۰/۰۰۹۲	۰/۰۱۵	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳۱
خشک	SSR	۱/۹ ÷ ۱۰ ^{-۳}	۴/۸ ÷ ۱۰ ^{-۴}	۱ ÷ ۱۰ ^{-۳}	۶/۹۹ ÷ ۱۰ ^{-۵}	۵/۱ ÷ ۱۰ ^{-۴}
	\bar{r}	۰/۹۵	۰/۹۸۸	۰/۹۷۴	۰/۹۹۸	۰/۹۸۷
	RMSE	۰/۰۲۲	۰/۰۱۳	۰/۰۲۲	۰/۰۰۸۴	۰/۰۱۵۹
مرطوب	SSR	۳/۲۵ ÷ ۱۰ ^{-۳}	۱/۱ ÷ ۱۰ ^{-۴}	۱/۹ ÷ ۱۰ ^{-۳}	۹/۷۵ ÷ ۱۰ ^{-۵}	۱/۰۱ ÷ ۱۰ ^{-۳}
	\bar{r}	۰/۹۲۷	۰/۹۷۳	۰/۹۵۵	۰/۹۹۸	۰/۹۷۷
	RMSE	۰/۰۲۹	۰/۰۱۹۹	۰/۰۳۲	۰/۰۰۹۹	۰/۰۲۲
تراکم استاندارد	SSR	۴/۹ ÷ ۱۰ ^{-۳}	۱/۷ ÷ ۱۰ ^{-۴}	۳ ÷ ۱۰ ^{-۳}	۸/۸۸ ÷ ۱۰ ^{-۵}	۱/۰۱ ÷ ۱۰ ^{-۳}
	\bar{r}	۰/۹۱	۰/۹۶۹	۰/۹۴۵	۰/۹۹۸	۰/۹۸۲
	RMSE	۰/۰۳۵	۰/۰۲۳۹	۰/۰۳۸۹	۰/۰۰۹۴	۰/۰۲۲
خشک	SSR	۷/۲ ÷ ۱۰ ^{-۳}	۲/۳۴ ÷ ۱۰ ^{-۴}	۴/۴ ÷ ۱۰ ^{-۳}	۹/۶ ÷ ۱۰ ^{-۵}	۹/۵ ÷ ۱۰ ^{-۴}
	\bar{r}	۰/۸۹	۰/۹۶۵	۰/۹۳۵	۰/۹۹۸۶	۰/۹۸۶
	RMSE	۰/۰۴۲	۰/۰۰۲۳	۰/۰۴۷	۰/۰۰۹۸	۰/۰۲۱۸
مرطوب	SSR	۹/۴ ÷ ۱۰ ^{-۳}	۳/۵۹ ÷ ۱۰ ^{-۳}	۶/۱ ÷ ۱۰ ^{-۳}	۵/۱۶ ÷ ۱۰ ^{-۴}	۱/۵ ÷ ۱۰ ^{-۳}
	\bar{r}	۰/۸۷	۰/۹۵۱	۰/۹۱۸	۰/۹۹۳۱	۰/۹۷۹
	RMSE	۰/۰۵۶	۰/۰۳۶	۰/۰۵۵	۰/۰۲۲۷	۰/۰۲۷۸
تراکم کاهش‌ی	SSR	۰/۰۱۱	۳/۵ ÷ ۱۰ ^{-۳}	۶/۶ ÷ ۱۰ ^{-۳}	۲/۵ ÷ ۱۰ ^{-۳}	۱/۸ ÷ ۱۰ ^{-۳}
	\bar{r}	۰/۸۸	۰/۹۵۹	۰/۹۲۳	۰/۹۶۹۹	۰/۹۷۹
	RMSE	۰/۰۵۱	۰/۰۳۴	۰/۰۵۷۵	۰/۰۵۱	۰/۰۳
خشک	SSR	۰/۰۱۳۳	۳/۷ ÷ ۱۰ ^{-۳}	۸/۰۴ ÷ ۱۰ ^{-۳}	۳/۳۷ ÷ ۱۰ ^{-۵}	۱/۶ ÷ ۱۰ ^{-۳}
	\bar{r}	۰/۸۶۷	۰/۹۶۳	۰/۹۱۹	۰/۹۹۹۷	۰/۹۸۴
	RMSE	۰/۰۶۶	۰/۰۳۵	۰/۰۶۳	۰/۰۰۵۸	۰/۰۲۸

نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲ موقعیت نسبی منحنی در پتانسیل بین ۱۵-۳۳ تغییر می‌کند که علت آن کاهش رطوبت

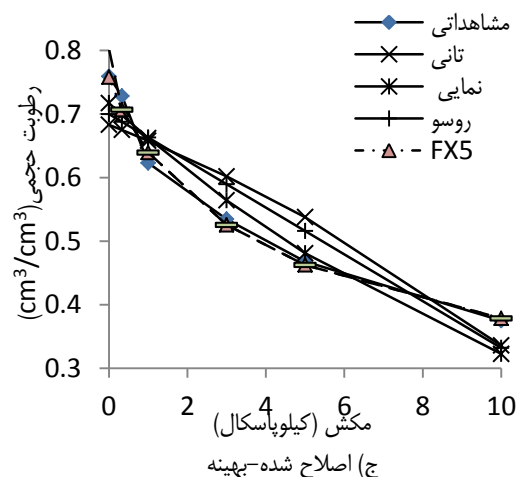
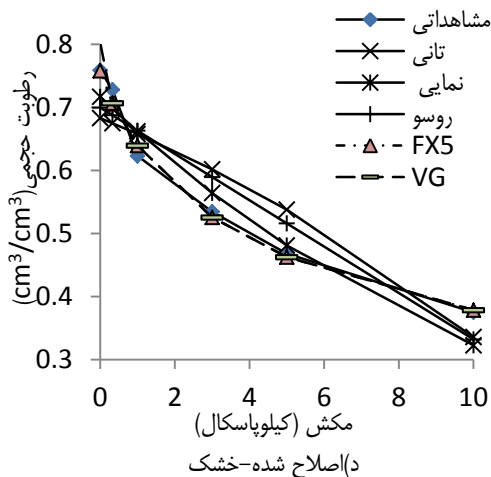
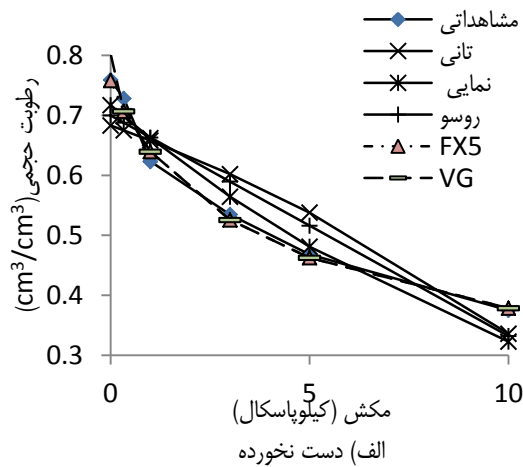
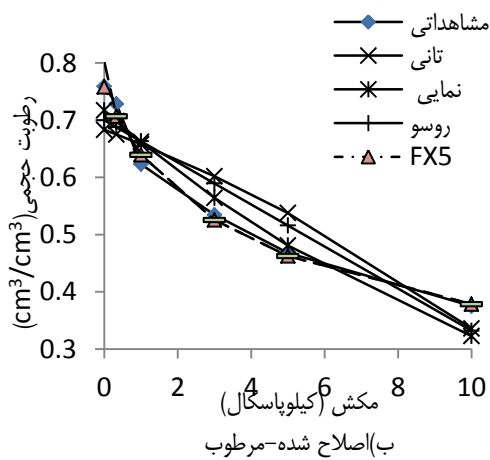
شکل ۲ تمام مدل‌های برازش یافته بر داده‌های تجربی خاک رسی متراکم را در شرایط تراکم و رطوبت متفاوت

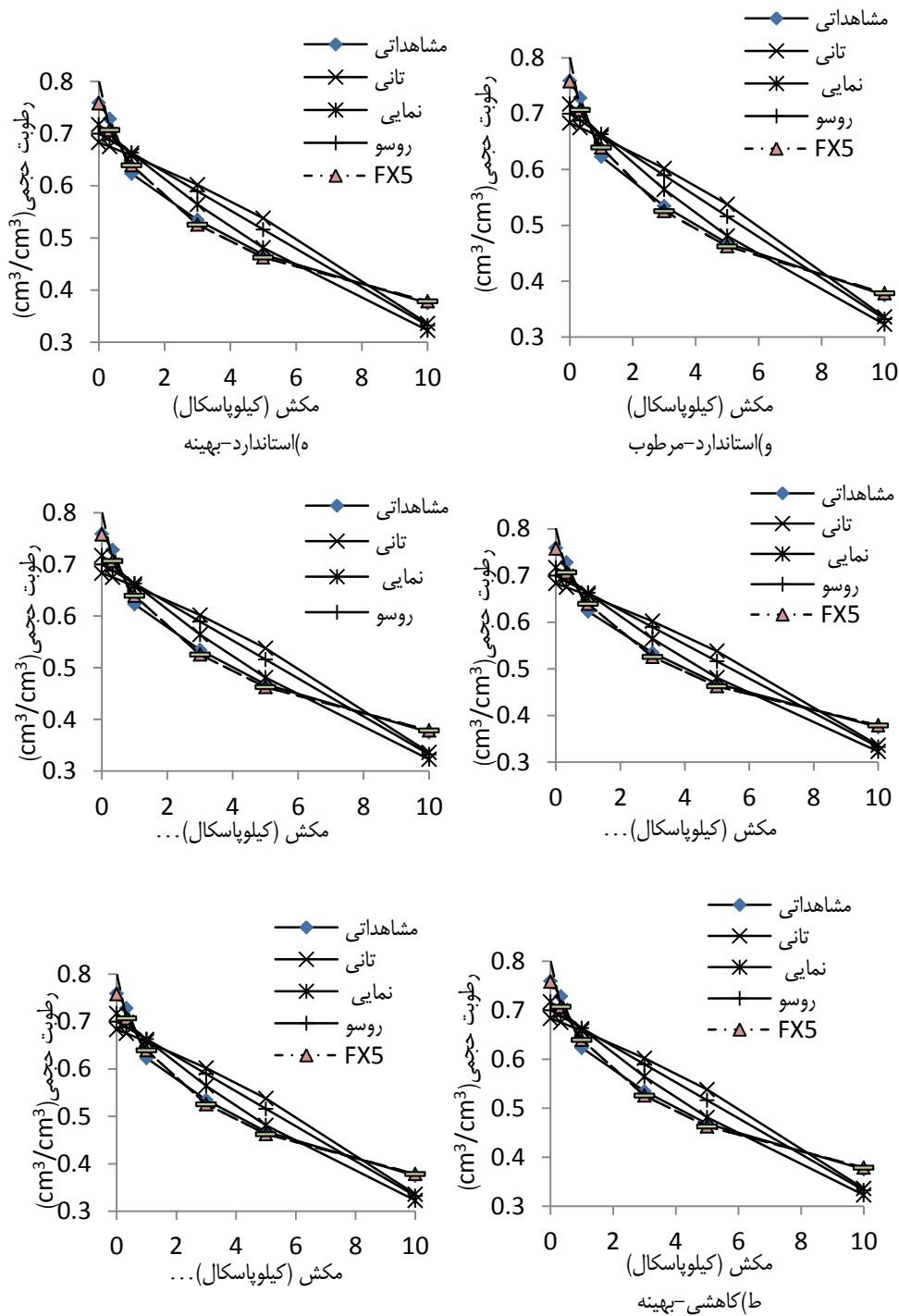
این مسئله ناشی از ساختمان خاک (ساختار ماکرو و میکرو) است. در شرایط مرطوب، رطوبت به صورت ماده روان‌کننده بین ذرات خاک عمل و به ذرات خاک کمک می‌کند به راحتی متراکم شود. هر چه رطوبت خاک بیشتر باشد، عمل تراکم راحت‌تر صورت می‌گیرد. رطوبت بهینه تفاوت معناداری با شرایط مرطوب ندارد، زیرا در رطوبت بهینه ذرات خاک به راحتی روی یکدیگر لغزیده و تغییر شکل زیادی به وجود می‌آورد.

بایرام و بهمنی (۱۳۹۴) دریافتند هر چه پلاستیسیته و میزان تراکم و رطوبت خاک افزایش یابد، افزایش بیشتری در نگهداشت آب در خاک حاصل می‌شود. افزایش نگهداشت موجب کاهش نفوذپذیری و نشت آلاینده می‌شود، همچنین کاهش آلودگی محل دفن زباله را در پی دارد.

نگهداری شده در خاک متراکم در پتانسیل کمتر از ۳۳ کیلوپاسکال و افزایش رطوبت نگهداری شده در پتانسیل بیش از ۳۳ کیلوپاسکال است. علت کاهش نگهداشت آب در پتانسیل کمتر از ۳۳ کیلو پاسکال، خروج رطوبت از منافذ درشت، همچنین از بین رفتن و کوچک‌تر شدن شعاع منافذ است. افزایش میزان نگهداشت آب در خاک در مکش بالاتر از ۳۳ کیلوپاسکال، افزایش سطح تماس بین خاک‌دانه‌ها به دلیل شکسته شدن خاک‌دانه‌ها، کاهش حجم منافذ درشت و افزایش منافذ ریز است که به دنبال آن موجب پیوستگی بین منافذ دربرگیرنده آب در خاک می‌شود.

تأثیر رطوبت بر تراکم و نگهداشت آب در خاک معمولاً در خاک خشک کمتر از خاک‌های مرطوب و بهینه است که با توجه به یافته‌های Bello و Osinubi (۲۰۱۰)





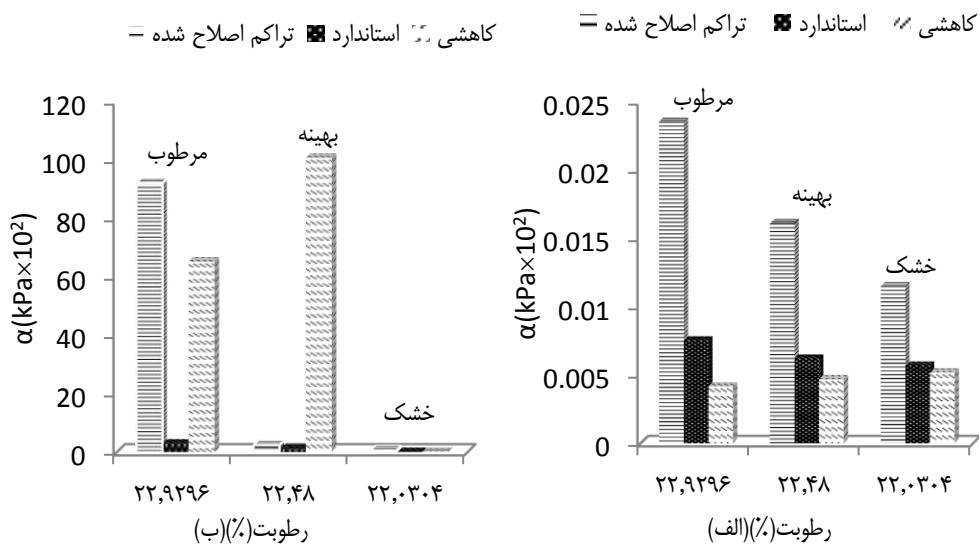
شکل ۲. مدل‌های برازشی Swcc

همکاران (۲۰۱۴) و بایرام و همکاران (۱۳۹۴) مدل‌های پنج پارامتری دقت بیشتری نسبت به چهار پارامتری و سه پارامتری دارد. با توجه به جدول ۳ و ۵، و بخش مواد و روش‌ها،

بر اساس شکل ۲، در تمامی نمونه‌ها، مدل VG و FX5 دقت بالایی در تخمین منحنی رطوبتی و مدل تانی نیز دقت پایینی در تخمین Swcc دارد که علت آن تعداد بالای پارامترهای مدل‌های VG و FX5 است. طبق نتایج Too و

بین ۰ و ۰/۳۸ دانستند. به طور کلی، ارتباط ضعیفی بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده θ_r وجود دارد که نشان‌دهنده قابلیت پایین مدل‌ها در برآورد رطوبت در مکش بالاست. مقدار رطوبت اشباع (θ_s) در مدل FX5 تنها در نمونه دست‌نخورده تقریباً مشابه با مقادیر اندازه‌گیری‌شده (۰/۷۶) پیش‌بینی شد و در مدل اشباع (θ_s) VG نیز بیش از مقدار اندازه‌گیری به دست آمد.

مقدار رطوبت باقی‌مانده (θ_r) به طور قابل‌توجهی بین مدل‌های شرایط تراکم متنوع است. مقدار θ_r در مدل FX5 به جز نمونه دست‌نخورده و شرایط مرطوب در تراکم استاندارد و اصلاح‌شده بیش از مقدار اندازه‌گیری، و در مدل VG کمتر از مقادیر اندازه‌گیری به دست آمد (جدول ۳). Leong و Rahardjo (۱۹۹۷) و Tinjum و همکاران (۱۹۹۷) بهترین مقدار مناسب برای θ_r را در بازه زمانی



نیروی کاپیلاری بیشتری به خاک چسبیده است، بنابراین مکش ورودی افزایش و α کاهش می‌یابد. مقدار نتایج به دست آمده با نتایج Konyai و همکاران (۲۰۰۹)، Miller و همکاران (۲۰۰۲)، و Leij و همکاران (۱۹۹۶) مطابقت دارد. آن‌ها دریافتند که مقدار α با افزایش تراکم و ذرات ریزدانه افزایش می‌یابد. مقادیر α با مقادیر به دست آمده در مطالعات Pedarla و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد. ایشان در پژوهشی درباره اثر رس مونت موریلونیت روی پارامترهای مدل مکش خاک دریافتند پارامتر α با افزایش رس و پلاستیسیته خاک افزایش می‌یابد. بنابراین، رطوبت بالا، رس و پلاستیسیته بالای خاک موجب افزایش اثر تراکم و α می‌شود.

طبق نتایج شکل ۳، با افزایش رطوبت مقدار α در تراکم استاندارد و اصلاح‌شده مدل‌های VG و FX5 افزایش می‌یابد، در حالی که در تراکم کاهشی مدل VG دارای روند کاهشی و در مدل FX5 دارای روندی متغیر است. سرانجام α در نمونه‌های متراکم با رطوبت اولیه بالا به مقدار ثابت می‌رسد. در واقع، این نمودار تأثیر رطوبت در ساختار خاک را به خوبی نشان می‌دهد و اینکه در تراکم در حالت خشک، ساختار ماکرو و در تراکم در حالت بهینه و مرطوب، ساختار میکرو مؤثر است (Osinubi & Bello, 2011). طبق نمودار، مقدار α در حالت خشک کمتر از حالت مرطوب است. با توجه به اینکه α عکس مکش ورودی هواست و چون در خاک خشک رطوبت تحت

۴. نتیجه‌گیری

Matlab، مدل FX5 و VG بهترین عملکرد را نسبت

به سایر مدل‌ها و مدل تانی نیز ضعیف‌ترین عملکرد را ارائه داد.

۳. ارتباط ضعیفی بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده θ_r و θ_s در مدل FX5 و VG وجود دارد.

۴. مقدار α با افزایش تراکم، همچنین رطوبت روند افزایشی دارد و در تراکم بالا با افزایش رطوبت به مقدار ثابت میل می‌کند.

در این تحقیق با استفاده از داده‌های صحرایی و آنالیزهای آزمایشگاهی مدل‌های تعیین SWCC خاک بررسی شد. مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱. افزایش تراکم موجب افزایش مقدار نگهداشت آب در خاک در پتانسیل بیش از ۳۳ کیلوپاسکال و در نتیجه موجب کاهش نشت آلاینده و آلودگی محیط می‌شود.

۲. از بین مدل‌های برازش‌یافته بر مدل‌های تجربی با

منابع

اسماعیل‌نژاد، ل.، رمضان‌پور، ح.، سیدمحمدی، ج.، شعبانپور، م. ۱۳۹۴. مقایسه کارایی انواع مدل‌ها در تشریح مناطق مختلف منحنی رطوبتی خاک. چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران- فیزیک خاک و رابطه آب، خاک و گیاه: ۴-۱۸.

اسمعیلی، ف.، فخاریان، ک. ۱۳۸۳. بررسی اثر شیرابه و آهک روی نفوذپذیری خاک رس موجود در محل دفن زباله‌های شهر تهران (خاکچال کهریزک). اولین کنگره ملی مهندسی عمران.

باقری، پ.، زمردیان، م.ع. ۱۳۸۸. تخمین منحنی مشخصه و هدایت هیدرولیکی غیراشباع در تراکم‌های مختلف خاک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

بایرام، م.، بهمنی، ا. ۱۳۹۴. تأثیر نوع خاک و وضعیت تراکم بر روی منحنی مشخصه رطوبتی خاک. مجله محیط زیست و مهندسی آب، ۱(۱): ۳۲-۵۰.

بایرام، م.، حیدری، ف.، سقایی، ص. ۱۳۹۴. بررسی مدل‌های برآورد منحنی مشخصه رطوبتی (SWCC). مجله محیط‌زیست و مهندسی آب، ۱(۱): ۳۲-۵۰.

بی‌نام. ۱۳۹۰. گزارش حاصل از مطالعات مرکز تحقیقات کشاورزی استان همدان. مؤسسه تحقیقات آب و خاک. جدول ۱.۳ تا ۴.۳، همدان.

بیات، ح.، ابراهیمی، ع.، راستگو، م.، زارع ابیان، ح. و دواتگر، ن. ۱۳۹۲. برازش مدل‌های مختلف منحنی مشخصه آب خاک بر داده‌های تجربی در کلاس‌های بافتی متفاوت استان گیلان. نشریه دانش آب و خاک، ۲۳(۳): ۱-۱۵۱.

عبدلی، م.ع.، قاضی‌زاده، ج.م. ۱۳۸۸. بررسی کارایی لاینرهای رسی متراکم‌شده در حذف طبیعی آلاینده‌های شیرابه تولیدی در محل دفن زباله‌های شهری (مطالعه موردی: محل دفن کهریزک). علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، ۱۱(۱): ۶۲.

قاضی‌زاده، ج.م.، عبدلی، م.ع.، صفری، ا. ۱۳۸۹. بررسی تغییرات نفوذپذیری لاینر رسی در تماس با شیرابه پسماند شهری (مطالعه موردی: محل دفن زباله کهریزک). محیط‌شناسی، ۳۶(۴۵): ۳۵-۴۲.

قائم‌زاده، ف.، بانژاد، ح. و بهمنی، ا. ۱۳۹۳. شبیه‌سازی حرکت کادمیم در شرایط مختلف خاک با مدل غیرتعادلی فیزیکی. نشریه دانش آب و خاک، ۲۴(۴): ۲۹-۴۴.

مرادی، ف.، خلیلی مقدم، ب.، جعفری، س. و قربانی دشتکی، ش. ۱۳۹۳. برآورد پارامتریک مدل‌های منحنی نگهداشت رطوبتی ون گنوختن و فردلند و زینگ با استفاده از تکنیک‌های محاسباتی نرم در برخی از خاک‌های استان خوزستان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۱۸(۶۹).

میرزایی، س.، قربانی دشتکی، ش. (۱۳۹۴). بررسی و مقایسه کارایی شاخص‌های ارزیابی مدل‌های منحنی رطوبتی خاک. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، جلد ۹: ۲۷۴-۲۸۲.

American Society for Testing and Materials (ASTM) D 698. 2007. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbs/ft³ (600 KN-m/m³)), annual book of ASTM standard.

American Society for Testing and Materials (ASTM) D3385-03. 2003. Standard test method for infiltration rate of soils in field using double-ring infiltrometer. Annual Book of ASTM Standards, 04,08.

American Society for Testing and Materials (ASTM) D 4318-98. 2000. Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soils. annual book of ASTM standard.

American Society for Testing and Materials (ASTM) D 1557. 2000. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbs/ft³ (2,700 KN-m/m³)) , annual book of ASTM standard.

American Society for Testing and Materials (ASTM) D 422 . 1998. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. annual book of ASTM standard, pp 546-556.

Barzegar, A.R., Asoodar, M.A. and Ansari, M. 2000. Effectiveness of sugarcane residue incorporation at different water contents and the Proctor compaction loads in reducing soil compactibility. Soil & Till Res., 57: 167-172.

Birle, E. 2012. Effect of initial water content and dry density on the pore structure and the soil-water retention curve of compacted clay. In C. Mancuso, C. Jommi, and F. D'Onza (Eds.), Unsaturated Soils: Research and Applications: 145-152.

Brooks, R.H. and Corey, A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media. Colorado State University, Hydrology Paper, No. 3, Fort Collins, USA.

Cornelis, W.M., Khlosi, M., Hartmann, R., Van Meirvenne, M. and De Vos, B. 2005. Comparison of unimodal analytical expressions for the soil-water retention curve. Soil Sci. Soc. Amer. J., 69(1): 1902-1911.

Daniel, D.E. and Benson, C.H. 1990. Water content-density criteria for compacted soil liners. J. Geotech. Eng., 116(12): 1811-1830.

Dieudonne, A., Levasseur, S., Charlier, R., Della Vecchia, G. and Jommi, C. 2013. A water retention model for compacted clayey soils. In S. Pietruszczack and G. Pande (Eds.), Computational Geomechanics, pp. 23-31.

EPA. 1993. Solid Waste Disposal Facility Criteria. Technical Manual Report No. EPA530-R-93-017. US Environmental Protection Agency. Cincinnati. OH.

Fredlund, D.G., Sheng, D., and Zaho, J. 2011. Estimation of soil suction from the soil water characteristic curve. Canadian Geotech. J., 48: 186-198.

Fredlund, D.G. and Xing, A. 1994. Equations for the soil water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, 31: 521-532. <http://dx.doi.org/10.1139/t94-061>.

Gardner, W.R. 1956. Mathematics of isothermal water conduction in unsaturated soils. in Highway Research Board Special Report 40 International Symposiums on Physico-Chemical Phenomenon in Soils. Washington, DC, USA: 78-87.

Hughes, K.L., Christy, A.D. and Heimlich, J.E. 2005. Ohio state university fact sheet: Landfill Types and Liner Systems. CDFS-138.

Konyai, S., Sriboonlue, V. and Trelo-Ges, V. 2009. The effect of air entry values on hysteresis of water. American Journal of Environmental Sciences, 5(3): 341-345.

Leij, F.J., Alves, W.J., van Genuchten, M.Th. and Williams, J.R. 1996. The unsoda unsaturated soil hydraulic database, version 1.0. EPA report EPA/600/R-96/095, EPA National Risk Management Laboratory, G-72, Cincinnati, OH, USA. (<http://www.epa.gov/ada/models.html>).

Leong, E.C. and Rahardjo, H. 1997. Review of soil-water characteristic curve equations. J Geotech Geoenviron, 123(12): 1106-1117.

- Lin, B. and Cerato, A.B. 2012. Investigation on soil-water characteristic curves of untreated and stabilized highly clayey expansive soils. *Geotech Geol. Eng.*, 30: 803-812. DOI 10.1007/s10706-012-9499-0.
- Miller, C.J., ASCE, M., Yesiller, N., ASCE, A.M., Yaldo, K. and Merayyan, S. 2002. Impact of soil type and compaction conditions on soil water characteristic. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*: 733-742.
- Osinubi, K.J. and Bello, A.A. 2011. Soil-water characteristics curves for reddish brown tropical soil. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*: 1-25.
- Omuto, C.T. 2007. HydroMe: Estimation of soil hydraulic parameters from experimental data. R Comprehensive R Archive Network, USA.
- Pedarla, A., Puppala, A.J., Chittoori, B., Hoyos, L.R., Zapata, C. and Houston, S. (2016). Influence of mineral montmorillonite on soil suction modelling parameters. 46(3): 291–298.
- Russo, D. 1988. Determining soil hydraulic properties by parameter estimation: On the selection of a model for the hydraulic properties. *Water Resour. Res.*, 24: 453-459.
- Sillers, W.S., Fredlund, D.G. and Zakerzadeh, C.N. 2001. mathematical attributes of some soil water characteristic curve models. *Geotechnical and Geological Engineering*, 19: 243-283.
- Tani, M. 1982. The properties of a water-table rise produced by a one-dimensional. vertical, unsaturated flow (in Japanese with English summary). *J. Jpn. For. Soc.*, 64: 409-418.
- Tinjum, J.M., Benson, C.H. and Blotz, L.R. 1997. Soil-water characteristic curves for compacted clays. *J. Geotech. Geoenviron, Eng.*, 123~11: 1060-1069.
- Too, V.K., Omuto, C.T., Biamah, E.K. and Obiero, J.P. 2014. Review of soil water retention characteristic (SWRC) models between saturation and oven dryness. *Open J. Modern Hydro.*, 4: 173-182.
- Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci Soc Am J.*, 44: 892-898.
- Zhai, Q. and Rahardjo, H. 2012. Determination of soil–water characteristic curve variables. *Computers and Geotechnics*, 42: 37-43.
- Wang, X. and Benson, C. 1995. Infiltration and saturated hydraulic conductivity of compacted clay. *J. Geotech. Engrg., ASCE*, 121(10): 713-722.
- Nam, S., Gutierrez, M., Diplas, P., Petrie, J., Wayllace, A., Lu, N. and Munoz, J.J. 2009. Comparison of testing techniques and models for establishing the SWC of riverbank soils, *Eng. Geo.*, 110: 1-10.