

تخمین منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک در تراکم‌های مختلف دو نمونه خاک با بافت متفاوت

پویان باقری و سید محمدعلی زمردیان^{۱*}

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۶/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۶/۶)

چکیده

هدایت هیدرولیکی یک پارامتر مهم مورد نیاز در طراحی سازه‌های ژئوتکنیکی همچون سدهای خاکی، کف سازی‌ها، دیوارهای حایل و سازه‌های زیست محیطی می‌باشد. در خاک‌های غیراشباع هدایت هیدرولیکی آب تابعی از درصد رطوبت و مکش آب خاک یعنی منحنی مشخصه رطوبتی خاک است. در این پژوهش مقادیر هدایت هیدرولیکی غیراشباع دو نوع خاک (سری رامجردی و هسته سد ملاصدرا) در ۵ تراکم مختلف با روش گاردنر اندازه‌گیری شدند. سپس هدایت هیدرولیکی غیراشباع توسط مدل‌های مختلف با استفاده از منحنی مشخصه رطوبتی تخمین زده شد و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شدند. نتایج نشان داد مدل فردلاندر و زینگ تخمین نسبتاً بهتری از منحنی مشخصه رطوبتی خاک را نسبت به مدل ون گنوختن ارائه می‌دهد. برای خاک سری رامجردی و تا رطوبت حجمی حدود ۰/۲۵ به ترتیب مدل‌های ون گنوختن-معلم و فردلاندر و همکاران تخمین خوبی از هدایت هیدرولیکی غیراشباع را ارائه دادند و برای خاک هسته سد ملاصدرا هیچ‌کدام از مدل‌ها تخمین مناسبی برای هدایت هیدرولیکی غیراشباع را ارائه نکردند.

واژه‌های کلیدی: منحنی مشخصه رطوبتی خاک، هدایت هیدرولیکی غیراشباع، خاک‌های متراکم

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mzomorod@shirazu.ac.ir

مقدمه

از اطلاعات مرحله قبل اقدام می‌شود. در آخرین مرحله به ازمایش مکش مورد نظر با استفاده از مدلی که ضرائب آن در مرحله دوم تعیین شده‌اند، درصد رطوبت حجمی نمونه تعیین می‌شود. از جمله مدل‌های موجود در این گروه می‌توان به مدل‌های ارایه شده توسط گاردنر (۶)، بروکس و کوری (۲)، ون گنوختن (۱۶) اشاره نمود. گروه سوم که بر پایه اصول فیزیکی بنا نهاده شده است با بهره‌گیری از بافت خاک به برقراری ارتباط میان نحوه توزیع حفرات با فشار آب موجود در آنها که نهایتاً به ارتباط بین درصد رطوبت خاک و مکش موجود در آن منتهی می‌شود می‌پردازد. از جمله مدل‌های موجود در این گروه، می‌توان به مدل‌های ارایه شده توسط آریا و پاریس (۱)، فردلانده و زینگ (۴) اشاره نمود. فردلانده و زینگ (۴) معادله ۱ را که یک معادله عمومی برای تعیین منحنی مشخصه رطوبتی خاک در محدوده صفر تا ۱,۰۰۰,۰۰۰ کیلو پاسکال مکش است ارایه کردند.

$$\theta_w = \theta_s C(\psi) \left[\frac{1}{\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right]} \right]^m \quad [1]$$

$$C(\psi) = \left(1 - \frac{\ln(1 + \psi / \psi_r)}{\ln(1 + 1000000 / \psi_r)} \right) \quad [2]$$

که ψ مکش موجود در خاک (kPa)، ψ_r مکش باقی‌مانده متناظر با درصد رطوبت باقی‌مانده θ_r (kPa)، θ_w درصد رطوبت در مکش ψ ، θ_s درصد رطوبت اشباع خاک، $e = 2.71828$ ، ضریب ثابت به منظور برازش دقیق‌تر مکش ورود هوا به داخل نمونه، n ضریب ثابتی که به منظور برازش دقیق‌تر نقطه عطف منحنی مشخصه رطوبتی خاک، m ضریب ثابتی که به منظور برازش دقیق‌تر درصد رطوبت باقی‌مانده به کار برده شده است که ضرایب a, m, n براساس یک رگرسیون غیرخطی به دست می‌آیند.

یکی از عوامل بسیار مهم حاکم در انتقال آب و املاح در خاک، هدایت هیدرولیکی غیراشباع است که تعیین آن در صحرا و آزمایشگاه علاوه بر وقت گیر بودن، بسیار هزینه‌بر است. از روش‌های اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک

وجود خاک‌های غیراشباع در مناطق مختلف طبیعت همچون خاک‌های موجود در تراز بالای آب زیرزمینی و خاکریزهای متراکم اهمیت شناخت رفتار این خاک‌ها را آشکار می‌سازد. درک چگونگی رفتار این نوع خاک‌ها در وضعیت‌های گوناگون تنش، برای انجام عملیات مختلف طراحی و اجرائی از قبیل پی‌ها، شیب‌ها، خاکریزها، گودبرداری‌ها، بررسی جریان در سدهای خاکی مانند آنالیز نشت در طراحی و مدل‌سازی این نوع سدها، بررسی قابلیت تراکم و تورم خاک‌ها، انتشار مواد آلاینده در خاک‌ها، فرونشست زمین، یخ‌زدگی، ذوب مجدد آب و اثرات آن در راه‌های درون و برون شهری و سازه‌های حایل بسیار مهم است. منحنی مشخصه رطوبتی خاک و رابطه بین هدایت هیدرولیکی و رطوبت در طرح‌های مختلف عمرانی و مسایل مربوط به حرکت آب در خاک کاربرد فراوان دارند و شناسایی رفتار فیزیکی خاک در رطوبت‌های مختلف را آسان‌تر می‌سازند. برای تعیین منحنی مشخصه رطوبتی خاک راه‌های زیادی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش‌های آزمایشگاهی و روش‌های تجربی اشاره کرد.

از جمله روش‌های آزمایشگاهی می‌توان دستگاه صفحات فشاری، سانتیفریوژهای دور سریع، سایکرومتر ترموکوپل و دستگاه صفحه مکش اشاره کرد. استفاده از روش‌های آزمایشگاهی به علت صرف وقت و هزینه زیاد کمتر مورد توجه محققین واقع است. روش‌های تجربی تعیین منحنی مشخصه رطوبتی را می‌توان در سه گروه دسته‌بندی کرد. گروه اول: براساس روش‌های آماری به پیش‌بینی درصد رطوبت در مکش مورد نظر اقدام می‌نمایند. از جمله مدل‌های موجود در بین این گروه می‌توان به مدل ارایه شده توسط گوپتا و لارسون (۸) اشاره کرد. روش‌های موجود در گروه دوم در مرحله اول با برازش مدل پیشنهادی بر داده‌های آزمایشگاهی، ضرائب ثابت مدل را تعیین می‌نمایند. در مرحله پیش‌گویی منحنی مشخصه رطوبتی خاک (مرحله دوم) با استفاده از یکی از روش‌های رگرسیون به تعیین ضرائب مدل برای نمونه مورد نظر با استفاده

$$K(S_e) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad [8]$$

که در آن K_s هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (cm d^{-1}) می‌باشد و مقدار l برابر 0.5 توصیه شده است.

فردلانند و همکاران (۵) معادله ارایه شده توسط چایلندز و کولیس-جرج (۳) را اصلاح کرده و به صورت زیر ارایه نمودند:

$$K_r(\theta) = \left[\int_{\theta_r}^{\theta} \frac{\theta - y}{\psi^2(y)} dy \right] / \left[\int_{\theta_r}^{\theta_s} \frac{\theta_s - y}{\psi^2(y)} dy \right] \quad [9]$$

که در این معادله θ ، θ_r و θ_s به ترتیب رطوبت حجمی خاک، رطوبت حجمی باقی مانده و رطوبت حجمی اشباع، y نیز یک متغیر برای انتگرال‌گیری وابسته به رطوبت است.

طیبی و همکاران (۱۵) تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع را برای دو نمونه خاک ریزدانه و در تراکم بهینه با دو روش مختلف برای محدوده وسیعی از درجه اشباع خاک به دست آوردند. توابع انتقالی توابعی می‌باشند که ویژگی‌های زود یافت خاک (عواملی که اندازه‌گیری آنها آسان، سریع و کم هزینه است و معمولاً در مطالعات اولیه خاک‌شناسی رایج هستند) را به ویژگی‌های دیر یافت خاک مانند منحنی رطوبتی، هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع تبدیل می‌کنند. شاپ و همکاران (۱۳) با استفاده از نمونه خاک‌های موجود در بانک اطلاعاتی UNSODA (لیج و همکاران (۹) و نمز و همکاران (۱۲)) که حداقل ۵ جفت نقطه برای منحنی $K-h$ داشتند، برنامه کامپیوتری ROSETTA را بر اساس شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک ارایه کردند. در برنامه ROSETTA، ۵ تابع انتقالی برای تخمین منحنی مشخصه رطوبتی خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع به کار برده می‌شود. زندپارسا و سپاسخواه (۱۷) و زند پارسا (۱۸) روش جدیدی را برای تعیین هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک ارایه کردند. مدل UNSATK توسط زند پارسا (۱۸) در محیط ویژوال بیسیک برای حل عددی معادله ارایه شده توسط

می‌توان به روش‌های زه‌کش داخلی، آب‌پاشی روی خاک، نیمرخ لحظه‌ای، سله، نفوذسنج قطره‌ای، تبخیر، جریان خروجی یک مرحله‌ای، جذب، هوای داغ، نفوذ، گاردنر و روش‌های معکوس اشاره کرد. از جمله روش‌های تخمین توابع هدایت هیدرولیکی-رطوبتی می‌توان به روش‌های تجربی، توابع انتقالی و روش‌های تحلیلی اشاره کرد. در روش‌های تجربی مدل‌های بسیاری برای شبیه‌سازی هدایت هیدرولیکی غیر اشباع در محیط‌های متخلخل ارایه شده است. معلم (۱۱) با انجام تحقیقات زیاد، معادله‌ای را برای تعیین هدایت هیدرولیکی غیر اشباع به صورت زیر ارایه کرد:

$$K_r(\theta) = \frac{K(\theta)}{K_s} \quad [3]$$

$$K_r = S_e^l \left[\frac{\int_{\theta_r}^{\theta} \frac{d\theta}{\psi}}{\int_{\theta_r}^{\theta_s} \frac{d\theta}{\psi}} \right]^2 \quad [4]$$

که در آنها $K_r(\theta)$ هدایت هیدرولیکی نسبی در رطوبت θ (m/s)، l نمای معادله معلم و ψ پتانسیل ماتریک (m) هستند. معلم l را برای اکثر خاک‌ها عددی ثابت و برابر 0.5 فرض کرد. محققین معادلات مختلفی را برای تعیین منحنی مشخصه رطوبتی خاک ارایه نمودند. ون گنوختن (۱۶) معادله زیر را برای تعیین منحنی مشخصه رطوبتی خاک ارایه نمود:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha h)^n \right]^m} \quad [5]$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad [6]$$

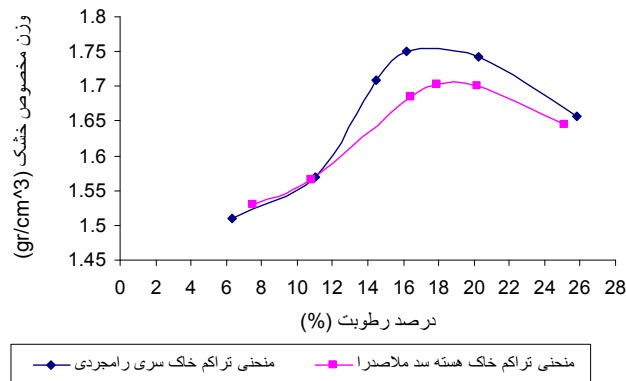
که در آن h مکش آب خاک (cm) و m, n, α ضرایب ثابت معادله هستند. ون گنوختن (۱۶) با جایگذاری معادله ۵ در معادله ۴ معادله زیر را به دست آورد:

$$K_r(S_e) = S_e^{0.5} \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad [7]$$

معادله [7] را به صورت زیر نیز می‌توان نوشت:

جدول ۱. طبقه‌بندی خاک‌ها با استفاده از روش متحد(یونیفاید)

نوع خاک	PI	PL	LL	ماسه (%)	لائی (%)	رس (%)	خاک
ML	۳/۱۷	۲۳/۴۴	۲۶/۶۱	۲۹	۴۴	۲۷	سری رامجردی
CL	۱۸/۸۰	۱۷/۵۶	۳۶/۳۶	۱۶	۳۷	۴۷	هسته سد ملاصدرا



شکل ۱. منحنی تراکم خاک سری رامجردی و خاک برداشت شده از هسته سد ملاصدرا

با استفاده از آزمایش‌ها الک و هیدرومتری منحنی دانه‌بندی نمونه خاک‌های برداشت شده در دو تکرار ترسیم و سپس براساس آن بافت خاک تعیین و خاک طبقه‌بندی شد. اطلاعات مربوط به خاک‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به داده‌های به دست آمده از جدول ۱ و براساس مثلث بافت خاک، خاک سری رامجردی دارای بافت Loam و خاک برداشت شده از هسته سد ملاصدرا دارای بافت Clay بود. سپس آزمایش تراکم به روش پراکتور استاندارد (روش استاندارد ASTM D698) برای هر کدام از نمونه خاک‌ها انجام شد، و منحنی تراکم برای دو نوع خاک ترسیم شد. در شکل ۱ منحنی تراکم خاک‌های مربوطه ارائه شده است. با داشتن منحنی تراکم برای دو نمونه خاک مورد مطالعه، ۵ نقطه از این منحنی برای انجام آزمایش‌ها انتخاب شدند که برای هر نمونه خاک شامل دو نقطه قبل از رطوبت بهینه و دو نقطه بعد از رطوبت بهینه و یک نقطه مربوط به رطوبت بهینه در منحنی تراکم بود. در جدول ۲ مقادیر چگالی ظاهری خشک و رطوبت‌های مختلف از دو خاک مورد نظر آورده شده است. به منظور تعیین هدایت هیدرولیکی غیراشباع و هم‌چنین منحنی مشخصه رطوبتی خاک

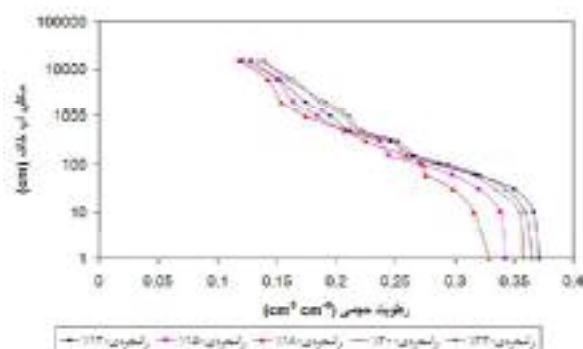
زندپارسا و سپاسخواه (۱۷) برای به دست آوردن رابطه بین $K(\theta)$ و θ نوشته شد. برنامه کامپیوتری UNSATK با استفاده از عوامل هیدرولیکی خاک $(\theta_s, \theta_r, n, \alpha)$ و یک مقدار اندازه‌گیری شده هدایت هیدرولیکی (مثلاً هدایت هیدرولیکی اشباع)، تابع هدایت هیدرولیکی خاک را تخمین می‌زند. با توجه به این که صحت سنجی کلیه مدل‌های ارائه شده به وسیله خاک‌های غیرمتراکم صورت گرفته در این پژوهش سعی گردیده اعتبار مدل‌های ارائه شده توسط خاک‌های متراکم نیز بررسی گردد.

مواد و روش‌ها

انجام این پژوهش در دو مرحله صورت پذیرفته است. مرحله اول شامل جمع‌آوری اطلاعات است و مرحله دوم شامل تحلیل و بررسی روی اطلاعات جمع‌آوری شده است. در مرحله اول دو نمونه خاک با بافت متفاوت شامل یک نمونه خاک برداشت شده از منابع قرضه هسته سد ملاصدرا و یک نمونه از خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز شامل سری رامجردی برداشت و آزمایشات گوناگون روی آنها انجام شد. که در ابتدا

جدول ۲. مقادیر چگالی ظاهری خشک و رطوبت‌های وزنی مختلف از دو خاک سری رامجردی و هسته سد ملاصدرا

خاک	ملاصدرا	خاک	رامجردی
چگالی ظاهری خشک (g/cm ³)	۱/۶۱	چگالی ظاهری خشک (g/cm ³)	۱/۶۴۵
رطوبت وزنی (%)	۱۳	رطوبت وزنی (%)	۱۳
	۱۶		۱۵
	۱۹		۱۸
	۲۱		۲۰
	۲۴		۲۳

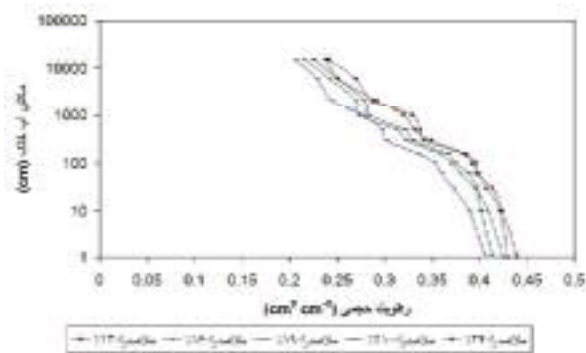


شکل ۲. منحنی مقادیر اندازه‌گیری شده مکش- رطوبت خاک سری رامجردی در تراکم‌های مختلف

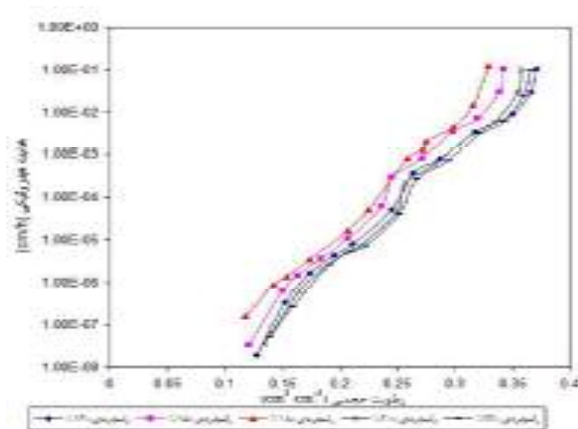
فشارها و مکش‌های مورد نظر بر روی هر کدام از نمونه‌ها اعمال شد. بدین منظور در دستگاه سلول فشاری، فشارهای ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۶۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر و هم‌چنین در دستگاه صفحه مکش، مکش‌های ۱، ۱۰، ۳۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ سانتی‌متر اعمال شد. سپس با استفاده از روش گاردنر (۶) منحنی مشخصه رطوبتی خاک و هدایت هیدرولیکی برای هر نمونه اندازه‌گیری شد. در شکل‌های ۲ و ۳ منحنی مقادیر اندازه‌گیری شده مکش-رطوبت برای این دو نوع خاک ارایه شده است. در شکل‌های ۴ و ۵ منحنی مقادیر اندازه‌گیری شده هدایت هیدرولیکی- رطوبت برای این دو نوع خاک ارایه شده است.

تحلیل و بررسی اطلاعات جمع‌آوری شده شامل سه قسمت زیر می‌باشد: ۱. برازش ضرایب و پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی، ۲. مقایسه مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده و

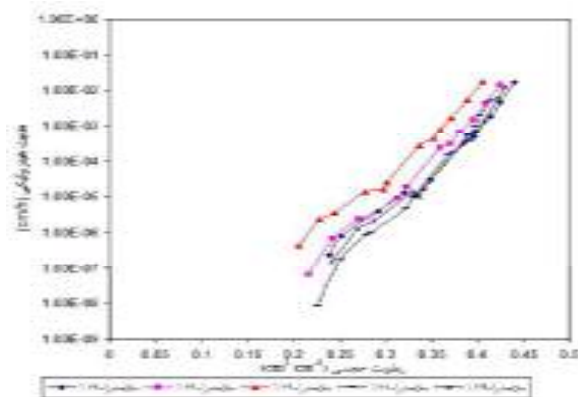
هر یک از خاک‌های مورد نظر به روش گاردنر (۶) عمل شد. بدین منظور نمونه‌هایی به قطر ۸ اینچ (۲۰۳/۲ میلی‌متر) و ارتفاع ۶۰ میلی‌متر و نیز قطر ۲ اینچ (۵۰/۸ میلی‌متر) و ارتفاع ۳۰ میلی‌متر تهیه و در آزمایشگاه مکانیک خاک بخش مهندسی آب دانشگاه شیراز با تراکم‌های مختلف شامل ۵ تراکم گفته شده تراکم شدند به‌نحوی که در رطوبت‌های مورد نظر مقدار تراکم به‌دست آمده برابر تراکم تعیین شده در آزمایش تراکم گردید. سپس هر یک از نمونه‌ها را روی صفحه متخلخل سلول فشاری به مدت ۲۴ ساعت تا ارتفاع ۲ میلی‌متر پایین‌تر از سطح بالای خاک در آب قرار داده تا رطوبت نمونه‌ها نزدیک به رطوبت اشباع گردد. در این مرحله نمونه اشباع با قطر ۸ اینچ (۲۰۳/۲ میلی‌متر) و ارتفاع ۶۰ میلی‌متر را درون دستگاه سلول فشاری و نیز نمونه اشباع با قطر ۲ اینچ (۵۰/۸ میلی‌متر) و ارتفاع ۳۰ میلی‌متر را درون دستگاه صفحه مکش قرار داده و



شکل ۳. منحنی مقادیر اندازه‌گیری شده مکش-رطوبت خاک هسته سد ملاصدرا در تراکم‌های مختلف



شکل ۴. منحنی مقادیر اندازه‌گیری شده هدایت هیدرولیکی-رطوبت برای خاک سری رامجردی در تراکم‌های مختلف



شکل ۵. منحنی مقادیر اندازه‌گیری شده هدایت هیدرولیکی-رطوبت برای خاک هسته سد ملاصدرا در تراکم‌های مختلف

۳. تخمین منحنی‌های هدایت هیدرولیکی-رطوبت. برای برازش ضرایب و پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی در ابتدا توسط نرم‌افزار Excel و استفاده از منوی Solver عوامل هیدرولیکی خاک مربوط به معادله ون گنوختن (۱۹۸۰)

۳. تخمین منحنی‌های هدایت هیدرولیکی-رطوبت. برای برازش ضرایب و پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی در ابتدا توسط نرم‌افزار Excel و استفاده از منوی Solver عوامل هیدرولیکی خاک مربوط به معادله ون گنوختن (۱۹۸۰)

۳. تخمین منحنی‌های هدایت هیدرولیکی-رطوبت. برای برازش ضرایب و پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی در ابتدا توسط نرم‌افزار Excel و استفاده از منوی Solver عوامل هیدرولیکی خاک مربوط به معادله ون گنوختن (۱۹۸۰)

۳. تخمین منحنی‌های هدایت هیدرولیکی-رطوبت. برای برازش ضرایب و پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی در ابتدا توسط نرم‌افزار Excel و استفاده از منوی Solver عوامل هیدرولیکی خاک مربوط به معادله ون گنوختن (۱۹۸۰)

۳. تخمین منحنی‌های هدایت هیدرولیکی-رطوبت. برای برازش ضرایب و پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی در ابتدا توسط نرم‌افزار Excel و استفاده از منوی Solver عوامل هیدرولیکی خاک مربوط به معادله ون گنوختن (۱۹۸۰)

۳. تخمین منحنی‌های هدایت هیدرولیکی-رطوبت. برای برازش ضرایب و پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی در ابتدا توسط نرم‌افزار Excel و استفاده از منوی Solver عوامل هیدرولیکی خاک مربوط به معادله ون گنوختن (۱۹۸۰)

قرار می‌گیرد. دلیل این موضوع را می‌توان این‌گونه بیان نمود که افزایش مکش آب خاک در اثر کاهش فشار آب حفره‌ای می‌باشد که این کاهش فشار آب حفره‌ای را می‌توان با کاهش رطوبت حجمی بیان نمود. همین روند را در مورد خاک هسته سد ملاصدرا می‌توان مشاهده کرد. از طرف دیگر می‌توان از داده‌های به‌دست آمده از این منحنی‌ها این‌طور نتیجه گرفت که عموماً منحنی مشخصه رطوبتی مربوط به خاک متراکم شده در سمت چپ منحنی تراکم (تراکم کمتر از رطوبت بهینه) قرار می‌گیرد یعنی با افزایش مکش مقدار رطوبت کمتری را در خود حفظ می‌کند. این موضوع برای تراکم‌های نزدیک رطوبت بهینه صادق است، که می‌توان علت آن را این‌طور بیان نمود که معمولاً با افزایش رطوبت تراکم، نفوذپذیری خاک کاهش می‌یابد. مقادیر رطوبت اشباع بدون توجه به نوع خاک با افزایش مقدار تراکم کاهش می‌یابند، یعنی کمترین مقدار رطوبت اشباع مربوط به تراکم در رطوبت بهینه می‌باشد (جداول ۳ و ۴).

در مکش آب خاک معین مقدار رطوبت حجمی در خاک سری رامجردی کمتر از خاک هسته سد ملاصدرا بود یعنی با توجه به نمودارهای به‌دست آمده منحنی‌های مشخصه رطوبتی خاک هسته سد ملاصدرا با مقدار رس بیشتر در تمام تراکم‌ها در سمت راست منحنی‌های مربوط به خاک سری رامجردی قرار می‌گیرند. در جداول ۳ و ۴ ضرایب برازش داده شده معادله ون گنوختن (۱۶)، و فردلانند و زینگ (۴) و هم‌چنین مقادیر MAE ، $RMSE$ ، SSE و تأثیر شیب و عرض از مبدأ از آزمون F برای دو نوع خاک انتخابی آورده شده است. در مورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع (اشکال ۴ و ۵) می‌توان گفت خاک سری رامجردی مقادیر هدایت هیدرولیکی غیراشباع بیشتری نسبت به خاک برداشت شده از هسته سد ملاصدرا داشت. به عبارت دیگر در یک رطوبت معین مقدار هدایت هیدرولیکی غیراشباع در خاک سری رامجردی بیشتر از خاک هسته سد ملاصدراست. نتایج مشابه برای دو نمونه خاک با مقادیر رس متفاوت توسط ژانگ و همکاران (۱۹) به‌دست آمده است.

تخمین زده شده معادله ون گنوختن و هم‌چنین پارامترهای a, m, n تخمین زده شده مربوط به معادله فردلانند و زینگ (۴) منحنی‌های مشخصه رطوبتی خاک‌های مورد نظر رسم شده‌اند. سپس به‌منظور مقایسه مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده با انجام آزمون‌های آماری F -Test، $RMSE$ و MAE بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از مدل‌های ون گنوختن (۱۶) و فردلانند و زینگ (۴) مقایسه‌ای بین آنها انجام شد. در نهایت تخمین منحنی‌های هیدرولیکی رطوبت $(K-\theta)$ توسط مدل‌های ون گنوختن-معلم (ون گنوختن (۱۶)) (VGM)، فردلانند و همکاران (۵) (FM)، (ROSETTA) (Version 1.0) ارایه شده توسط شاپ و لیچ (۱۳) و (UNSATK) ارایه شده توسط زندپارسا (۱۸) براساس منحنی مشخصه رطوبتی انجام شد. با موجود بودن مقادیر اندازه‌گیری شده منحنی مشخصه رطوبتی برای تراکم‌های مختلف از دو نوع خاک مورد نظر عوامل هیدرولیکی معادله ون گنوختن $(\theta_s, \theta_r, n, \alpha)$ مورد نیاز برای اجرای مدل‌های (VGM)، (ROSETTA)، (UNSATK) تعیین گردید و مدل‌های فوق برای هر کدام از خاک‌ها اجرا شدند. به‌منظور تخمین منحنی هدایت هیدرولیکی-رطوبت $(K-\theta)$ براساس روش پیشنهادی فردلانند و همکاران (FM) از نرم‌افزار Geo-Office (Version 5) قسمت Seep/W استفاده شد. سپس به‌منظور مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده هدایت هیدرولیکی خاک‌های مورد نظر توسط مدل‌های (VGM)، (ROSETTA)، (UNSATK) و (FM) از آزمون‌های آماری $RMSE$ و MAE برای هر کدام از روش‌های استفاده شد.

نتایج و بحث

با توجه به شکل‌های ۲ و ۳ مربوط به منحنی‌های مشخصه رطوبتی می‌توان گفت در خاک سری رامجردی، در منحنی مشخصه رطوبتی خاک مربوط به تراکم بهینه (۱۸٪) با افزایش مکش آب خاک مقدار رطوبت کمتری در خاک باقی می‌ماند یعنی منحنی مشخصه رطوبتی در سمت راست منحنی‌های دیگر

جدول ۳. ضرایب و پارامترهای برازش داده شده معادله ون گنوختن (۱۶)، و فردلاند و زینگ (۴) در خاک سری رامجردی با تراکم‌های مختلف

روش ونگنوختن (۱۹۸۰)									
R ²	MAE	RMSE	SSQ	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	n	α (cm ⁻¹)	رطوبت وزنی	نوع خاک
۰/۹۹۹۶	۰/۰۰۰۴۶	۰/۰۰۰۵۲	۰/۰۰۰۰۳	۰/۳۷۱۵	۰/۰۹۵۶	۱/۳۴۳	۰/۰۲۱۵	۱۳	رامجردی
۰/۹۹۴۱	۰/۰۰۰۴۳	۰/۰۰۰۵۵	۰/۰۰۰۰۴	۰/۳۴۲۷	۰/۰۷۹۲	۱/۲۹۳	۰/۰۲۲۳	۱۵	رامجردی
۰/۹۹۲۵	۰/۰۰۰۴۶	۰/۰۰۰۵۲	۰/۰۰۰۰۳	۰/۳۲۹۲	۰/۰۳۹۹	۱/۲۲۳	۰/۰۲۳۷	۱۸	رامجردی
۰/۹۹۱۳	۰/۰۰۰۵۹	۰/۰۰۰۶۷	۰/۰۰۰۰۵	۰/۳۵۷۸	۰/۰۸۴۲	۱/۲۶۲	۰/۰۲۴۹	۲۰	رامجردی
۰/۹۹۴۹	۰/۰۰۰۴۴	۰/۰۰۰۵۲	۰/۰۰۰۰۳	۰/۳۶۵۲	۰/۰۸۶۶	۱/۲۷۲	۰/۰۲۳	۲۳	رامجردی
روش فردلاند و زینگ (۱۹۹۴)									
R ²	MAE	RMSE	SSQ	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	m	n	a (kPa)	رطوبت وزنی	نوع خاک
۰/۹۹۷۲	۰/۰۰۰۳۳	۰/۰۰۰۴۳	۰/۰۰۰۰۲	۰/۳۷۳۴	۰/۴۴۶۸	۱/۳۸۵	۴/۵۱۴۸	۱۳	رامجردی
۰/۹۹۴۸	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۵۲	۰/۰۰۰۰۳	۰/۳۴۵	۰/۴۶۰۵	۱/۲۱۸	۴/۷۱۹	۱۵	رامجردی
۰/۹۹۳۵	۰/۰۰۰۴۷	۰/۰۰۰۵۶	۰/۰۰۰۰۴	۰/۳۲۹۷	۰/۵۸۲۷	۰/۹۲۲	۶/۴۷۹۸	۱۸	رامجردی
۰/۹۹۳۴	۰/۰۰۰۴۷	۰/۰۰۰۵۸	۰/۰۰۰۰۴	۰/۳۶۰۴	۰/۴۰۴۷	۱/۲۸۷	۴/۲۱۲۳	۲۰	رامجردی
۰/۹۹۶۱	۰/۰۰۰۳۸	۰/۰۰۰۴۶	۰/۰۰۰۰۳	۰/۳۶۶۶	۰/۴۱۴۸	۱/۲۸۰	۴/۶۱۵۷	۲۳	رامجردی

جدول ۴. ضرایب و پارامترهای برازش داده شده معادله ون گنوختن (۱۶)، و فردلاند و زینگ (۴) در خاک هسته سد ملاصدرا با تراکم‌های مختلف

روش ونگنوختن (۱۹۸۰)									
R ²	MAE	RMSE	SSQ	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	n	α (cm ⁻¹)	رطوبت وزنی	نوع خاک
۰/۹۹۱۵	۰/۰۰۰۵۴	۰/۰۰۰۶۱	۰/۰۰۰۰۴	۰/۴۴۰۱	۰/۰	۱/۱۰۷	۰/۰۲۳۳	۱۳	ملاصدرا
۰/۹۹۱۷	۰/۰۰۰۴۹	۰/۰۰۰۶۱	۰/۰۰۰۰۴	۰/۴۲۵۴	۰/۰۸۷۶	۱/۱۵۹	۰/۰۲۶۹	۱۶	ملاصدرا
۰/۹۹۲۸	۰/۰۰۰۴۴	۰/۰۰۰۵۴	۰/۰۰۰۰۳	۰/۴۰۶۸	۰/۰۰۸۸	۱/۱۱۱	۰/۰۳۸۶	۱۹	ملاصدرا
۰/۹۹۲۷	۰/۰۰۰۴۵	۰/۰۰۰۵۳	۰/۰۰۰۰۳	۰/۴۱۳۴	۰/۱۵۴۵	۱/۲۳۷	۰/۰۱۳۱	۲۱	ملاصدرا
۰/۹۸۷۵	۰/۰۰۰۵۱	۰/۰۰۰۶۷	۰/۰۰۰۰۵	۰/۴۲۹۴	۰/۰۰۵۶	۱/۱۰۲	۰/۰۱۹۸	۲۴	ملاصدرا
روش فردلاند و زینگ (۱۹۹۴)									
R ²	MAE	RMSE	SSQ	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	m	n	a (kPa)	رطوبت وزنی	نوع خاک
۰/۹۹۱۱	۰/۰۰۰۵۵	۰/۰۰۰۶۱	۰/۰۰۰۰۵	۰/۴۴۱۳	۰/۳۶۱۸	۰/۸۰۹	۶/۵۶۰۸	۱۳	ملاصدرا
۰/۹۹۱۹	۰/۰۰۰۴۶	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۴	۰/۴۲۵۵	۰/۳۳۷۱	۰/۹۷۱	۴/۷۲۸۵	۱۶	ملاصدرا
۰/۹۹۲۶	۰/۰۰۰۴۴	۰/۰۰۰۵۴	۰/۰۰۰۰۴	۰/۴۰۸۱	۰/۳۶۸۷	۰/۸۴۳	۴/۰۹۴۱	۱۹	ملاصدرا
۰/۹۹۲۹	۰/۰۰۰۴۱	۰/۰۰۰۵۳	۰/۰۰۰۰۳	۰/۴۱۳۵	۰/۲۶۳۴	۱/۲۵۶	۶/۸۳۲۴	۲۱	ملاصدرا
۰/۹۸۷۶	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۶۶	۰/۰۰۰۰۵	۰/۴۲۹۵	۰/۲۷۹۴	۰/۹۸۶	۶/۵۷۴۶	۲۴	ملاصدرا

جدول ۵. مقادیر محاسبه شده RMSE و MAE بین مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده هدایت هیدرولیکی خاک‌های سری رامجردی و هسته سد ملاصدرا در تراکم‌های مختلف

MAE (cm ³ cm ⁻³)				RMSE (cm ³ cm ⁻³)				رطوبت وزنی	نوع خاک
VGM	ROSETTA	FM	UNSATK	VGM	ROSETTA	FM	UNSATK		
۰/۴۱۴۸	۱/۷۱۹۴	۰/۵۵۱۱	۱/۵۲۴۳	۰/۵۷۶۶	۱/۷۴	۰/۹۵۳۶	۳/۶۰۳۶	۱۳	رامجردی
۰/۴۷۲۲	۱/۷۱۸۸	۰/۷۷۷۷	۱/۷۸۴۳	۰/۶۰۶۶	۱/۷۳۹۶	۱/۲۷۰۱	۴/۸۱۴۱	۱۵	رامجردی
۰/۶۰۰۵	۱/۷۲۱۹	۰/۶۷۱۹	۱/۲۷۴۷	۰/۷۰۶۸	۱/۷۴۲۵	۰/۹۹۴۳	۲/۸۳۳۱	۱۸	رامجردی
۰/۵۵۶۲	۱/۷۲۱۷	۰/۸۳۵۸	۲/۲۷۱۸	۰/۶۸۲۳	۱/۷۴۲۵	۱/۴۷۱۹	۷/۵۴۷۳	۲۰	رامجردی
۰/۵۲۳	۱/۷۱۹۴	۰/۷۸۳۴	۱/۷۶۵۶	۰/۶۵۵۹	۱/۷۴	۱/۵۶۳۱	۴/۸۰۰۵	۲۳	رامجردی
۱/۵۸۵۸	۱/۸۷۹	۱/۵۷۰۹	۳/۶۲۰۸	۱/۶۶۱۸	۱/۸۹۲۵	۴/۵۵۸۳	۱۷/۲۱۶	۱۳	ملاصدرا
۱/۳۶۷۵	۱/۸۷۹	۱/۶۶۵۸	۴/۰۷۰۴	۱/۴۵۲۶	۱/۸۹۲۵	۵/۴۱۷۸	۲۰/۹۱۳	۱۶	ملاصدرا
۱/۹۶۱۲	۱/۸۸۰۵	۱/۵۱	۳/۸۲۱۶	۲/۰۶۷۴	۱/۸۹۴	۴/۷۳۸۳	۱۹/۶۸۵	۱۹	ملاصدرا
۱/۷۶۷۲	۱/۸۷۹	۱/۱۱۰۴	۱/۸۷۹۶	۰/۸۴۶۱	۱/۸۹۲۵	۳/۲۶۴۵	۵/۱۹۷۱	۲۱	ملاصدرا
۱/۸۷۹	۶/۷۹۸۱	۱/۱۹۳۳	۱/۵۸۳۱	۱/۸۹۲۵	۶/۸۷۷۸	۲/۶۸۱۸	۴/۲۲۳	۲۴	ملاصدرا

به‌جز در تراکم با رطوبت ۱۸٪ در بقیه تراکم‌ها مقادیر RMSE، MAE برای مدل فردلانند و زینگ (۴) کمتر از مدل ون گنوختن (۱۶) است. این مورد نیز برای مقادیر R² که از مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده به‌دست آمده نیز قابل مشاهده است (مقادیر R² در تمامی موارد به‌جز در تراکم با رطوبت ۱۸٪ در خاک سری رامجردی برای مدل فردلانند و زینگ (۴) بیشتر از مدل ون گنوختن (۱۶) است). هم‌چنین در خاک برداشت شده از هسته سد ملاصدرا در تراکم‌های ۱۳٪ و ۱۶٪ مقادیر RMSE، MAE برای مدل فردلانند و زینگ (۴) بیشتر از مدل ون گنوختن (۱۶) است، و در بقیه تراکم‌ها این مقادیر کمتر است. پس می‌توان گفت برای خاک سری رامجردی و خاک برداشت شده از هسته سد ملاصدرا در تراکم‌های مختلف مدل فردلانند و زینگ (۴) تخمین نسبتاً بهتری از منحنی‌های مشخصه رطوبتی خاک را نسبت به مدل ون گنوختن (۱۶) ارائه می‌دهد ولی این تفاوت محسوس نیست. در خاک‌هایی با مشخصات مندرج در جدول ۱ آزمایشات تعیین منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیراشباع به روش گاردنر (۶) انجام شد. در جدول ۵ مقادیر محاسبه شده RMSE و MAE بین مقادیر اندازه‌گیری شده و

مشابه با پژوهش‌های گذشته (میلر و همکاران (۱۰) و استنیتزر و میورر (۱۴)) منحنی‌های مشخصه رطوبتی مربوط به خاک هسته سد ملاصدرا با افزایش سطوح تراکم تخت‌تر شدند. سطوح تراکم پایین (تراکم در رطوبت‌های ۱۳ و ۲۳٪ برای خاک سری رامجردی و ۱۳ و ۲۴٪ برای خاک هسته سد ملاصدرا) تأثیر بسزایی روی منحنی‌های مشخصه رطوبتی ندارند، نتایج مشابهی در پژوهش‌های گرین و همکاران (۷) و ژانگ همکاران (۱۹) به‌دست آمده‌اند. از آن طرف در سطح تراکم بالا به‌علت این‌که تراکم تأثیر قابل توجهی بر منافذ خاک دارد هدایت هیدرولیکی غیراشباع و مکش آب خاک در یک رطوبت معین کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابند. (اشکال ۲، ۳، ۴ و ۵). ژانگ و همکاران (۱۹) به نتایج مشابهی برای دو نوع خاک متفاوت دست یافتند. هم‌چنین استنیتزر و میورر (۱۴) با آزمایش روی هدایت هیدرولیکی غیراشباع در یک خاک سیلت لومی متراکم شده و غیرمتراکم و در مکش‌های بالای ۱۰ kPa به نتایج مشابهی رسیدند. با انجام آزمون‌های آماری که بین رطوبت‌های اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده با دو روش ون گنوختن (۱۶) و فردلانند و زینگ (۴) انجام شده می‌توان مشاهده کرد که در خاک سری رامجردی

ون گنوختن (۱۶) منحنی مشخصه رطوبتی دو نوع خاک سری رامجردی و هسته سد ملاصدرا در تراکم‌های مختلف را پیش‌بینی می‌کند.

• منحنی‌های تابع هدایت هیدرولیکی-رطوبت برداشت شده از هسته سد ملاصدرا با داشتن مقدار رس بیشتر نسبت به خاک سری رامجردی در یک هدایت هیدرولیکی معین دارای رطوبت حجمی بیشتری هستند، یعنی منحنی به سمت راست میل می‌کند.

• در هر دو نمونه خاک منحنی تابع هدایت هیدرولیکی-رطوبت مربوط به تراکم در رطوبت بهینه در یک هدایت هیدرولیکی معین دارای رطوبت حجمی کمتری است، یعنی منحنی در سمت چپ منحنی‌های دیگر واقع شده است.

• برای خاک سری رامجردی و تا رطوبت حجمی حدود ۰/۲۵ به ترتیب مدل‌های (VGM) و (FM) تخمین خوبی از هدایت هیدرولیکی غیراشباع را ارائه می‌دهند.

• برای خاک هسته سد ملاصدرا هیچ‌کدام از مدل‌ها تخمین مناسبی برای هدایت هیدرولیکی غیراشباع را ارائه نمی‌دهند، ولی در رطوبت‌های بالا به ترتیب مدل‌های (FM)، (UNSATK) و (VGM) تخمین بهتری برای هدایت هیدرولیکی غیراشباع را ارائه می‌دهند.

• برای خاک هسته سد ملاصدرا برای تراکم‌های بعد از رطوبت بهینه مدل‌های (FM) و (UNSATK) نسبت به تراکم‌های دیگر تخمین بهتری برای هدایت هیدرولیکی غیراشباع را ارائه می‌دهند.

تخمین زده شده هدایت هیدرولیکی خاک‌های مورد نظر آورده شده است. با توجه به جدول ۵ می‌توان مشاهده کرد مقادیر RMSE و MAE برای خاک سری رامجردی به ترتیب برای روش‌های VGM و FM مقادیر کمتری را نشان می‌دهد و می‌توان گفت که این مدل‌ها تخمین بهتری از هدایت هیدرولیکی غیراشباع نسبت به دیگر مدل‌ها ارائه می‌دهند. ولی برای خاک هسته سد ملاصدرا هیچ‌کدام از روش‌ها تخمین مناسبی از هدایت هیدرولیکی غیراشباع را ارائه نمی‌دهند.

نتیجه‌گیری

خلاصه نتایج این تحقیق عبارت‌اند از:

• چنانچه خاک‌ها با چگالی ظاهری بیشتری متراکم شوند، منحنی مشخصه رطوبتی آنها در یک مکش معین دارای رطوبت حجمی کمتری است، یعنی منحنی به سمت چپ میل می‌کند و همچنین هر چقدر با رطوبت بیشتری خاک متراکم شود، منحنی مشخصه رطوبتی آن در یک مکش معین دارای رطوبت حجمی بیشتری می‌باشد، یعنی منحنی به سمت راست میل می‌کند.

• نتایج آزمون F نشان داد که برای دو نمونه خاک سری رامجردی و هسته سد ملاصدرا مقادیر تخمین زده شده رطوبت به‌خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده آن در تراکم‌های مختلف خاک مطابقت دارد، هم‌چنین شیب و عرض از مبدأ منحنی عبوری از بین مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده رطوبت تفاوت چشمگیری بین شیب و عرض از مبدأ با خط ۱:۱ مشاهده نشد.

• مدل فردلاند و زینگ (۴) با دقت نسبتاً بیشتری نسبت به مدل

منابع مورد استفاده

1. Arya, L.M. and J.F. Paris. 1981. A physico-empirical model to predict the soil moisture-characteristic from particle size distribution and bulk density data. Soil Sci. Soc. Am. J. 45: 1023-1030.
2. Brooks, R. H. and A. T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper No. 3, Colorado State Univ., Fort Collins, Colo.
3. Childs, E. C. and N. Collis-George. 1950. The permeability of porous materials. Proc. R. Soc. London, Ser. A, 201: 392-405.
4. Fredlund, D. G. and A. Xing. 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. Can. Geotech. J. 31: 521-532.
5. Fredlund, D. G., A. Xing and S.Y. Huang. 1994. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. Can. Geotech. J. 31: 533-546.

6. Gardner, W.R. 1958. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.* 85: 228-232.
7. Green, T.R., L.R. Ahuja and J.G. Benjamin. 2003. Advances and challenges in predicting agricultural management effects on soil hydraulic properties. *Geoderma* 116:3-27.
8. Gupta, S. C. and W.E. Larson. 1979. Estimating soil-water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. *Water Resour. Res.* 15: 1633-1635.
9. Leij, F.J., W.J. Alves, M.TH. van Genuchten and J.R. Williams. 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.
10. Miller, C.J., M. Asce, N. Yesiller, A.M. Asce, K. Yaldo and S. Merayyan. 2002. Impact of soil type and compaction conditions on soil water characteristic. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 128:733-742.
11. Mualem, Y. 1976b. A new model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12: 513-522.
12. Nemes, A., M.G. Schaap, F.J. Leij and J. H. M. Wosten. 2001. Description of the unsaturated soil hydraulic database UNSODA version 2.0. *J. of Hydrol.* 251: 151-162.
13. Schaap, M.G. and F.J. Leij. 2000. Improvement prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem-van Genuchten model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 843-851.
14. Stenitzer, E. and E. Murer. 2003. Impact of soil compaction upon soil water balance and maize yield estimated by the SIMWASER model. *Soil Till. Res.* 73:43-56.
15. Taibi, S., V.B. Katla, S.G. Chahira and J.M. Fleureau. 2009. Measurements of unsaturated hydraulic conductivity functions of two fine-grained materials. *Soils and Found.* 49(2): 181-191.
16. 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.
17. Zand-Parsa, SH. and A.R. Sepaskhah. 2004. Soil hydraulic conductivity function based on specific liquid-vapor interfacial area around the soil particles. *Geoderma* 119: 143-157.
18. Zand-Parsa, SH. 2006. Improved soil hydraulic conductivity function based on specific liquid-vapor interfacial area around the soil particles. *Geoderma* 132: 20-30.
19. Zhang, SH., H. Grip and L. Lovdahl. 2006. Effect of soil compaction on hydraulic properties of two loess soils in China. *Soil & Till. Res.* 90: 117-125.

Estimation of Soil Water Characteristic Curve and Unsaturated Hydraulic Conductivity of Two Soil Textures at Different Compactions

P. Bagheri and S. M. A. Zomorodian^{1*}

(Received : Sep. 12-2011 ; Accepted : Aug. 27-2012)

Abstract

Hydraulic conductivity is an important parameter in the design of geotechnical structures such as earth dam, floor construction, retaining walls and environmental structures. In unsaturated soils, hydraulic conductivity is a function of moisture content and soil water suction i.e. soil moisture characteristic curve. In this study, the values of unsaturated hydraulic conductivity in two soil types (Ramjerdi and Molasadra core dam series) at 5 different compactions using Gardner method were measured. Then, the unsaturated hydraulic conductivity was estimated by different models using the soil moisture characteristic curve and was compared with measured values. The results showed that Fredlund and Xing models predict the soil moisture characteristic curves more accurately compared with van Genuchten model. For Ramjerdi soil series and up to nearly 0.25 volumetric water content, (VGM) and (FM) models indicated a good estimation for unsaturated soil conductivity. Also, for Molasadra core dam none of the models resulted in acceptable estimations for unsaturated hydraulic conductivity.

Keywords: Soil moisture characteristic curve, Unsaturated hydraulic conductivity, Compacted soils

1. Dept. of Water Construc., College of Agric., Shiraz Univ., Shiraz, Iran.

*: Corresponding Author, Email: mzomorod@shirazu.ac.ir