مجله پژوهش آب ایران
سال پنجم/ شماره نهم/ پاییز و زمستان ۱۳۹۰ (۱۱۳-۱۲۰)

مقیاس‌بندی منحنی مشخصه رطوبتی خاک‌های غیرمتشابه

بیژن قهرمان[۱*]، مرتضی صادقی[۲] و محمدرضا گهردوست‌منفرد[۳]

چکیده

برای تخمین میزان تغییر مکانی توابع هیدرولیکی خاک، روش‌های مقیاس‌بندی توسعه یافته‌اند. از این میان، روش‌های دارای پایه فیزیکی به‌دلیل امکان تخمین فاکتورهای مقیاس از روی ویژگی‌های فیزیکی خاک، مطلوب‌تر بوده‌اند. در این راستا، کوزوگی و هاپمنز با این فرض که توزیع اندازه‌ی منافذ خاک از توزیع لوگ- نرمال پیروی می‌کند، روشی را ارائه کردند که برای مقیاس‌بندی منحنی رطوبتی از پایه‌ای فیزیکی برخوردار بود. اما کاربرد این روش نیز همانند روش‌های پیشین به خاک‌های متشابه محدود می‌شود. برای رفع این محدودیت، در این مقاله روشی پیشنهاد می‌شود که برای خاک‌های غیرمتشابه پایه‌ی فیزیکی دارد. با استفاده از این روش، داده‌های مربوط به گستره‌ی وسیعی از خاک‌ها را می‌توان بدون نیاز به شرط تشابه خاک-ها می‌توانند با هم مقیاس و با یک منحنی نمایی یکتا نمایش داد. این روش با ۴۸۷ سری از داده‌های منحنی رطوبتی برگرفته از پایگاه UNSODA شامل تمامی کلاس‌های بافتی خاک، از شن تا رس، صحت‌سنجی شد. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی در مقیاس‌بندی منحنی‌های رطوبتی عملکرد بهتری نسبت به روش کوزوگی و هاپمنز دارد. به نحوی‌که پارامتر تعریف‌شده برای خطای مقیاس‌بندی برای روش‌های پیشنهادی و کوزوگی و هاپمنز به ترتیب برابر با ۰/۰۷۴ و ۰/۱۰۵ به دست آمد. به‌علاوه نشان داده شد که بر خلاف روش‌های پیشین، خطای مقیاس‌بندی در روش پیشنهادی به بافت خاک بستگی ندارد و تمامی خاک‌ها برای مقیاس‌بندی از احتمال برابر برخوردارند.

واژه‌های کلیدی: محیط‌های متشابه، کوزوگی و هاپمنز، خاک‌های غیرمتشابه، منحنی مرجع نمایی

ارجاع: قهرمان ب. صادقی م. و گهردوست‌منفرد م. ۱۳۹۰. مقیاس‌بندی منحنی مشخصه رطوبتی خاک‌های غیرمتشابه. مجله پژوهش آب ایران. ۵ (۹): ۱۱۳- ۱۲۰.

۱- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۳- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
*** نویسنده مسئول:** bijanghan@um.ac.ir
تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۹/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۴/۰۷

Archive of SID
www.SID.ir

مقدمه

نحوه‌ی برخورد با تغییرپذیری مکانی خاک‌ها مشکلی اساسی در پیش روی دانشمندان علوم مرتبط با خاک است. این تغییرپذیری به‌ویژه در توابع هیدرولیکی خاک‌ها، شامل منحنی رطوبتی و تابع هدایت هیدرولیکی، تحلیل روابط جریان آب در خاک را با مشکل مواجه می‌کند (واریک و همکاران، ۱۹۷۷).

برای تخمین این تغییرپذیری، میلر و میلر (۱۹۵۶) نظریه‌ی "محیط‌های متشابه" را معرفی کردند. آن‌ها فرض کردند که ساختار میکروسکپی دو خاکی که از نظر هندسی متشابه هستند، تنها در نسبت‌هایی از یک طول مشخصه‌ی فیزیکی تفاوت دارند. بر پایه‌ی این نظریه، روش‌های مقیاس‌بندی (scaling) توسعه یافتند که در آن‌ها توابع هیدرولیکی خاک‌های مختلف را می‌توان با نسبت‌هایی از یک طول مشخصه فیزیکی، تحت عنوان "فاکتور مقیاس"، بر روی یک منحنی مرجع قرار داد (به عنوان مثال: صادقی و قهرمان، ۱۳۸۷، صادقی و همکاران، ۱۳۸۷؛تولی و همکاران، ۲۰۰۱).

برای سادگی کاربرد نظریه‌ی محیط‌های متشابه در خاک‌های واقعی، واریک و همکاران (۱۹۷۷) بیان کردند که برای یافتن فاکتورهای مقیاس نیازی به جستجو برای طول مشخصه‌ی فیزیکی نیست. آن‌ها پیشنهاد کردند که منحنی مرجع را می‌توان با میانگینی از تمامی منحنی‌ها تعیین کرد و آن‌گاه فاکتورهای مقیاس به‌صورت تجربی می‌توانند به‌گونه‌ای به‌دست آیند که هر منحنی مقیاس شده با حداقل خطا بر روی منحنی مرجع واقع شود. در ادامه، سیمونز و همکاران (۱۹۷۹) با جایگزینی شرط تشابه در شکل توابع هیدرولیکی به‌جای تشابه هندسی خاک‌ها در نظریه‌ی میلرها، روشی برای مقیاس‌بندی خاک‌ها ارایه کردند. ووگل و همکاران (۱۹۹۱) نیز شرط تغییرپذیری خطی خاک‌ها را شرط لازم برای مقیاس‌بندی دانستند.

روش‌های مذکور اگرچه به سادگی کاربرد روش میلرها کمک کردند، اما در آن‌ها فاکتورهای مقیاس ماهیتاً تجربی است و مفهوم فیزیکی ندارند. برتری‌های روش‌های فیزیکی بر روش‌های تجربی، به طور عمده شامل تخمین فاکتورهای مقیاس از روی ویژگی‌های فیزیکی خاک، پژوهش‌گران را در سال‌های اخیر به توسعه‌ی روش‌های فیزیکی برانگیخته است. در راستای این هدف، کوزوگی و هاپمنز (۱۹۹۸) روشی برای مقیاس‌بندی منحنی رطوبتی بر اساس مفاهیم فیزیکی خاک‌ها ارایه نمودند. آن‌ها فرض کردند که توزیع اندازه‌ی منافذ خاک لوگ- نرمال است. بر این اساس، آن‌ها مدل رطوبتی زیر را اختیار کردند (کوزوگی، ۱۹۹۶):

$$S_e = 0.5 erfc \frac{(\ln h - \ln h_m)}{\sigma\sqrt{2}} \qquad (۱)$$

که در آن h مکش آب خاک، $erfc$ تابع مکمّل خطا، h_m و σ به‌ترتیب میانه و انحراف معیار توزیع لوگ- نرمال و S_e درجه اشباع موثر با تعریف زیر می‌باشد:

$$S_e = (\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r) \qquad (۲)$$

با قبول فرض لوگ- نرمال بودن توزیع اندازه‌ی منافذ خاک، طبق تعریف میلرها (۱۹۵۶)، دو خاک که مقادیر σ در آن‌ها برابر بوده ولو که h_m در آن‌ها متفاوت باشد، متشابه خواهند بود. کوزوگی و هاپمنز (۱۹۹۸) شعاع منفذ میانه‌ی خاک را به‌عنوان طول مشخصه‌ی فیزیکی به‌کار گرفتند و مقیاس‌بندی مکش را به‌صورت زیر پیشنهاد کردند:

$$h^* = \frac{\hat{h}_m}{h_{m_i}} h \qquad (۳)$$

که در آن h^* مکش مقیاس‌شده و h_{m_i} و $\hat{h}_m$ مکش‌های میانه (مکش در S_e=0.5) به‌ترتیب برای نمونه‌ی خاک i- ام و منحنی مرجع، که از معادله زیر پیروی می‌کند، هستند.

$$S_e = 0.5 erfc \frac{(\ln h^* - \ln \hat{h}_m)}{\hat{\sigma}\sqrt{2}} \qquad (۴)$$

به‌گونه‌ای که:

$$\ln \hat{h}_m = (1/I)\sum_{i=1}^{I} \ln h_{m_i} \qquad (۵،الف)$$

$$\hat{\sigma}^2 = (1/I)\sum_{i=1}^{I} \ln \sigma_i^2 \qquad (۵،ب)$$

که در آن‌ها σ_i و $\hat{\sigma}$ انحراف معیار توزیع لوگ-نرمال به ترتیب برای نمونه خاک i- ام و منحنی مرجع و I تعداد نمونه‌ها است.

Archive of SID

www.SID.ir

کاربرد روش کوزوگی و هاپمنز (K-H) نیز، همچون روش‌های پیشین، به خاک‌های متشابه محدود می‌شود که برای مقیاس‌بندی خاک‌های واقعی غیرمتشابه، محدودیت به‌شمار می‌آید. این محدودیت به‌ویژه زمانی که مقیاس‌بندی خاک‌هایی از کلاس‌های بافتی مختلف مد نظر باشد، کارایی مقیاس‌بندی را کاهش خواهد داد. برای از بین بردن این محدودیت و حذف شرط تشابه خاک‌ها برای مقیاس‌بندی توابع هیدرولیکی، پیش‌تر صادقی و همکاران (۱۳۸۷) روش را برای مقیاس‌بندی تابع هدایت هیدرولیکی ارایه کردند که دارای پایه فیزیکی بود. این پژوهش با هدف رفع محدودیت مذکور در مورد منحنی رطوبتی صورت گرفته است. در این مقاله روشی با پایه‌ی فیزیکی برای مقیاس‌بندی منحنی رطوبتی در خاک‌های غیرمتشابه ارایه می‌شود.

مواد و روش‌ها

با توجه به شکل مدل‌های ارایه شده برای منحنی رطوبتی خاک، به‌طور کلی دو گونه مدل را می‌توان یافت: (الف) مدل‌هایی که در آن‌ها به مجرد این‌که مکش خاک (h) بزرگ‌تر از صفر شود، خاک از حالت اشباع خارج می‌شود. این مدل‌ها معمولاً S- شکل هستند. مدل‌های ون‌گنوختن (۱۹۸۰) و لوگ-نرمال دو پارامتری (کوزوگی، ۱۹۹۶) از این نوع می‌باشند. (ب) مدل‌هایی که در آن‌ها فرض می‌شود تا زمانی‌که مکش خاک از مقدار حدی موسوم به مکش ورود هوا (h_b) تجاوز نکند، خاک همچنان اشباع باقی می‌ماند. مدل‌های بروکس و کوری (۱۹۶۴) و لوگ- نرمال سه پارامتری (کوزوگی، ۱۹۹۴) از این دسته می‌باشند.

از آن‌جاکه S_e در بازه‌ی بین صفر تا یک تغییر می‌کند، مساحت محدود به منحنی رطوبتی و محور مکش ممکن است گزینه‌ای مناسب برای مقیاس‌بندی مکش باشد. مساحت مذکور در فضای احتمالاتی، در واقع مکش میانگین منحنی رطوبتی (h_{mean}) است.

$$h_{mean} = \int_0^1 h.dS_e \qquad (۶)$$

بر اساس روابط مربوط به توزیع لوگ- نرمال، معادله‌ی بین مکش میانگین و مکش میانه به‌صورت زیر است:

$$h_{mean} = h_m \exp(\frac{\sigma^2}{2}) \qquad (۷)$$

به نظر می‌رسد که برای رسیدن به روش مقیاس‌بندی جامع‌تر به‌منظور کاربرد برای خاک‌های غیرمتشابه، کاربرد مدل‌های نوع دوم و جابه‌جایی محور h به اندازه‌ی h_b راه‌گشا می‌باشد. در نتیجه، معادله‌ی زیر را برای مقیاس‌بندی مکش پیشنهاد می‌شود.

$$h^* = \frac{(h - h_b)}{(h_{mean} - h_b)} \qquad (۸)$$

h^* با h معادله‌ای خطی دارد و طبق تعاریف محیط‌های متشابه، عکس شیب این خط (یعنی $(h_{mean}\text{-}h_b)^{-1}$) به عنوان فاکتور مقیاس درنظر گرفته می‌شود. h_{mean} و h_b به‌ترتیب مکش متناظر با منفذ میانگین و بزرگ‌ترین منفذ خاک است. بر این اساس، در این روش، طول مشخصه‌ی فیزیکی اختیار شده برابر است با اختلاف شعاع منفذ میانگین و بزرگ‌ترین منفذ خاک. بنابراین، روش پیشنهادی نیز همچون روش K-H بر پایه‌ی مفاهیم فیزیکی ارایه شده در نظریه‌ی محیط‌های متشابه میلرها است.

منحنی‌هایی که از معادله‌ی ۸ مقیاس می‌شوند، از برخی ویژگی‌های منحصر به‌فرد برخوردارند. از آن جمله به $dS_e / dh^* < 0$ ، $\int_0^\infty S_e(h^*)dh^* = 1$ ، $S_e(0) = 1$ و $d^2 S_e / dh^{*2} > 0$ اشاره می‌شود. در نتیجه پیش‌بینی می‌شود که این ویژگی‌ها برای تمامی خاک‌ها تقریباً تغییرناپذیر باشند. می‌توان به آسانی نشان داد که تمامی این ویژگی‌ها با منحنی زیر ارضاء می‌شوند:

$$S_e = \exp(-h^*) \qquad (۹)$$

بنابراین، امکان دارد که از معادله‌ی ۹ به‌عنوان منحنی مرجع برای بیان منحنی رطوبتی مقیاس‌شده تمامی خاک‌ها استفاده شود. این منحنی بر خلاف روش‌های پیشین یکتا و ثابت است و به منحنی‌های مشخصه‌ی رطوبتی خاک‌ها در مقیاس‌بندی بستگی ندارد. با ترکیب معادلات ۸ و ۹ داریم:

$$S_e = \exp\left[-\frac{(h - h_b)}{(h_{mean} - h_b)}\right] \qquad (۱۰)$$

Archive of SID

www.SID.ir

معادله‌ی ۱۰ در واقع مدلی نمایی برای منحنی رطوبتی ارایه می‌کند به‌گونه‌ای‌که h_{mean} و h_b را می‌توان با برازش این معادله، به‌عنوان پارامترهای تجربی برای هر خاک به دست آورد. روشن است که عملکرد مقیاس‌بندی در روش پیشنهادی تنها به دقت برازش معادله ۱۰ بر روی منحنی‌های رطوبتی خاک‌ها بستگی دارد و برای مقیاس‌بندی نیازی به تشابه هندسی خاک‌ها نمی‌باشد. این بدان معنی است که اگر منحنی رطوبتی خاکی دقیقاً از شکل معادله ۱۰ پیروی کند، منحنی رطوبتی مقیاس‌شده در آن خاک نیز دقیقاً بر روی منحنی مرجع (معادله ۹) واقع خواهد شد.

برای ارزیابی روش مقیاس‌بندی پیشنهادی، داده‌های منحنی رطوبتی مربوط به ۴۸۷ خاک از پایگاه داده‌ی UNSODA (لیج و همکاران، ۱۹۹۹) استفاده شد. در واقع خاک‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شدند که تعداد جفت نقاط اندازه‌گیری شده‌ی منحنی رطوبتی در آن‌ها بیش از چهار باشد و مقدار θ_s نیز در آن‌ها مشخص باشد. داده‌های انتخاب شده، ۱۱ کلاس بافتی (از شن تا رس) را شامل شدند.

برای کاربرد روش‌های K-H و پیشنهادی، معادلات ۱ و ۱۰ به‌ترتیب بر روی تمامی داده‌های منحنی رطوبتی برازش داده شدند. در برازش‌ها، θ_s ثابت و برابر با مقدار اندازه‌گیری شده‌ی آن و h_m، h_{mean}، σ، h_b و θ_r به‌عنوان پارامترهای برازش درنظر گرفته شدند. برای انجام برازش، یک برنامه‌ی رایانه‌ای در محیط MATLAB نوشته شد. در این برنامه برای برازش مدل به جفت نقاط، از کمینه‌سازی مجموع مربعات خطا (SSE) مطابق تعریف زیر استفاده شد:

$$SSE = \sum_{i=1}^{N} \left(\theta_{m_i} - \theta_{f_i}\right)^2 \qquad (۱۱)$$

که در آن θ_{m_i} و θ_{f_i} به‌ترتیب درصد رطوبت اندازه‌گیری شده و برازش داده شده و N تعداد جفت نقاط اندازه‌گیری شده‌ی موجود در هر خاک است.

برای مقیاس‌بندی مکش با استفاده از روش‌های K-H و پیشنهادی، به‌ترتیب از معادلات ۳ و ۸ استفاده شد.

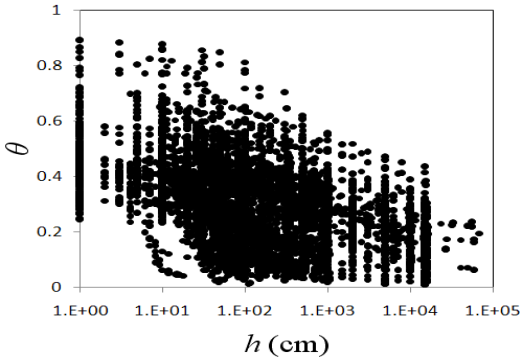
برای ارزیابی کمّی جهت مقایسه‌ی عملکرد دو روش، یک پارامتر انحراف از منحنی مرجع (d) برای هر نقطه‌ی مقیاس شده به‌صورت زیر تعریف شد:

$$d = \left|S_{e_i} - S_{e_R}\right| \qquad (۱۲)$$

که در آن S_{e_i} و S_{e_R} درجه‌ی اشباع موثر به‌ترتیب برای هر داده‌ی مقیاس‌شده و نظیر آن بر روی منحنی مرجع می‌باشند. با توجه به معادله‌ی ۱۰ می‌توان دریافت که پارامتر d علاوه بر خطای مقیاس‌بندی، خطای برازش معادله‌ی ۱۰ را نیز در هر نقطه از منحنی رطوبتی نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

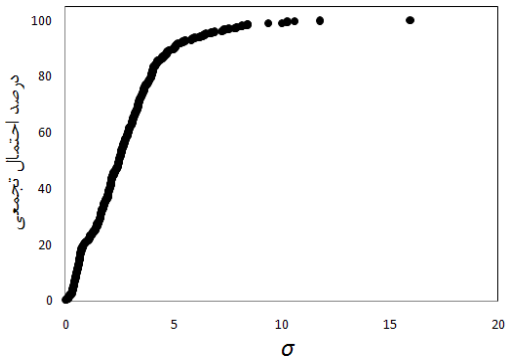
تمامی ۴۸۷ سری منحنی رطوبتی که در این پژوهش از آنها استفاده شد، در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. این شکل به‌خوبی نشان می‌دهد که خاک‌های استفاده شده گستره‌ی بافتی زیادی (از شن تا رس) دارند. تعداد جفت نقاط منحنی‌ها از ۵ تا ۵۲ متغیر بود. در شکل ۲ توزیع تجمعی احتمال مقادیر σ حاصل از برازش مدل کوزوگی (معادله‌ی ۱) بر روی منحنی‌های رطوبتی نشان داده شده است. این شکل آشکارا نشان می‌دهد که پراکندگی مقادیر σ بسیار زیاد (از ۰/۰۲۶ تا ۱۵/۹۷۷) بوده و ضریب تغییرات آن‌ها ۷۳ درصد می‌باشد. این در حالی است که طبق پژوهش داس و همکاران (۲۰۰۵) خاک‌هایی را می‌توان متشابه دانست که ضریب تغییرات مقادیر σ در آن‌ها کم‌تر از ۱۰ درصد باشد. بنابراین، شرط تشابه هندسی در این خاک‌ها وجود ندارد و خاک‌های انتخاب شده کاملاً غیرمتشابه‌اند.



شکل۱- داده‌های منحنی رطوبتی ۴۸۷ نمونه خاک انتخاب شده از پایگاه UNSODA (لیج و همکاران،۱۹۹۹)

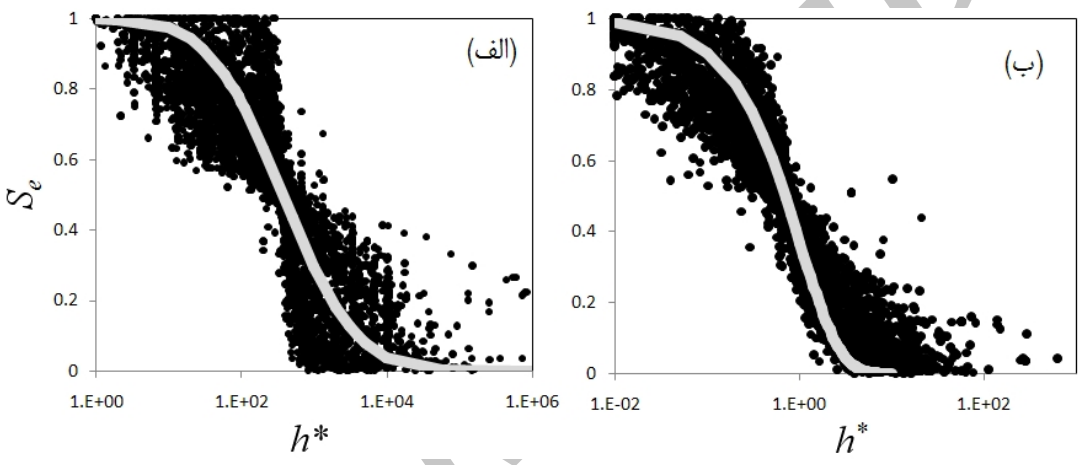
Archive of SID

www.SID.ir



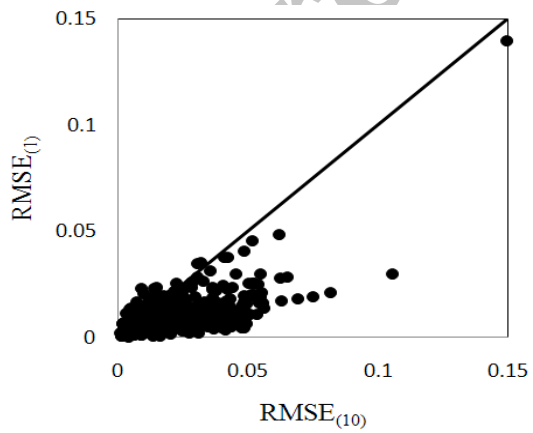
شکل۲- توزیع تجمعی احتمال مقادیر σ حاصل از برازش مدل کوزوگی

شکل ۳ منحنی‌های رطوبتی مقیاس شده‌ی را با استفاده از روش K-H (شکل ۳-الف) و روش پیشنهادی (شکل ۳-ب) نشان می‌دهد. مقایسه‌ی دو شکل (۳-الف) و (۳-ب) نشان می‌دهد که پراکندگی داده‌های مقیاس‌شده در اطراف منحنی مرجع در روش پیشنهادی نسبت به روش K-H کم‌تر است. مقادیر میانگین پارامتر انحراف از منحنی مرجع (d) برای دو شکل (۳-الف) و (۳-ب) به ترتیب برابر ۰/۱۰۵ و ۰/۰۷۴ است که حدوداً ۳۰ درصد بهبود عملکرد مقیاس‌بندی را در روش پیشنهادی نشان می‌دهد.



شکل ۳- منحنی‌های رطوبتی مقیاس شده با استفاده از روش‌های (الف) کوزوگی و هاپمنز (K-H) و (ب) پیشنهادی. خط ممتد منحنی مرجع می‌باشد

خطای مقیاس‌بندی در روش K-H به‌طور عمده به اختلاف بین σ هر خاک با σ خاک مرجع (عدم برقراری تشابه هندسی) مربوط می‌شود. هرچند، که دقت برازش مدل کوزوگی (معادله ۱) نیز در این خطا نقش دارد. اما در روش پیشنهادی، همان‌طور که پیش از این نیز بیان شد، خطای مقیاس‌بندی تنها به دقت برازش معادله‌ی ۱۰ بر روی داده‌های منحنی رطوبتی بستگی دارد. در شکل ۴ مقادیر ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE) در برازش معادلات ۱ و ۱۰ بر داده‌های منحنی رطوبتی نشان داده شده است.



شکل ۴- مقادیر ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE) در برازش معادلات ۱ و ۱۰ بر داده‌های منحنی رطوبتی

www.SID.ir

این شکل نشان از برتری معادله‌ی ۱ نسبت به معادله‌ی ۱۰ در برازش دارد و انحراف داده‌های مقیاس‌شده را نسبت به منحنی مرجع در روش پیشنهادی توجیه می‌کند. اما همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شد، برآیند انحرافات ناشی از برازش معادله‌ی ۱ و هم‌چنین عدم تشابه هندسی خاک‌ها در روش K-H، بیش‌تر از انحرافات ناشی از ضعف برازش معادله‌ی ۱۰ در روش پیشنهادی است.

بحث فوق، مبنی بر تفاوت در منشاء خطاهای مقیاس‌بندی در دو روش، برای کارایی این روش‌ها در خاک‌های غیرمتشابه مهم است. برای درک بهتر این موضوع، مقادیر میانگین d به تفکیک کلاس‌های بافتی برای دو روش K-H و پیشنهادی در جدول ۱ ارایه شده است. نکته‌ی اول که از این جدول قابل برداشت است، تفاوت روند مقادیر میانگین d با کلاس‌های بافتی بین دو روش است. در روش پیشنهادی، با تغییر بافت خاک از سبک تا سنگین، روند خاصی در خطای مقیاس‌بندی دیده نمی‌شود و بنابراین به نظر می‌رسد که خطای مقیاس‌بندی به بافت خاک هیچ بستگی نداشته باشد. اما در روش K-H (زمانی که برای تمامی کلاس‌ها یک منحنی مرجع در نظر گرفته می‌شود)،خطای مقیاس‌بندی در خاک‌های متوسط‌بافت که به منحنی مرجع نزدیک‌ترند، کم‌تر و در خاک‌های حدّی (خیلی سبک و خیلی سنگین) بیش‌تر است. نکته‌ی دوم این است که در روش K-H، با مقیاس‌بندی به‌صورت جداگانه برای هر کلاس (در نظر گرفتن یک منحنی مرجع برای هر کلاس) مقادیر میانگین d کاهش می‌یابد که به‌دلیل کاهش پراکندگی مقادیر σ منحنی‌های دخیل در مقیاس‌بندی و نزدیک‌تر شدن به برقراری شرط تشابه هندسی خاک‌ها (داس و همکاران، ۲۰۰۵) است. بنابراین، برای این روش محاسبات بیشتر لازم است تا فلسفه‌ی وجودی مقیاس‌بندی را کم تأثیر کند. نکته‌ی سوم این است که در برخی از کلاس‌های بافتی، عملکرد روش K-H حتی پس از انجام مقیاس‌بندی جداگانه برای هر کلاس، بازهم از عملکرد روش پیشنهادی پایین‌تر است. این مساله نشان از تغییرپذیری بالای σ در آن کلاس‌های بافتی دارد. مجموعه‌ی این بحث‌ها بر کارایی بیش‌تر روش پیشنهادی نسبت به روش K-H در مقیاس‌بندی خاک‌های غیرمتشابه دلالت دارد.

جدول ۱- مقادیر میانگین انحراف از منحنی مرجع (d) برای دو روش K-H و پیشنهادی به تفکیک کلاس‌های بافتی.

بافت خاک	شن	شن لومی	لوم شنی	لوم	سیلت	لوم رسی	لوم سیلتی	لوم رسی شنی	رس سیلتی	رس	نامشخص
تعداد خاک‌ها	۹۵	۳۴	۵۳	۵۷	۳	۱۱۳	۱۹	۲۹	۲۷	۲۲	۱۴
پیشنهادی	۰/۰۴۲	۰/۰۴۵	۰/۰۷۰	۰/۰۹۶	۰/۰۷۸	۰/۰۹۰	۰/۰۸۵	۰/۰۶۶	۰/۱۱۵	۰/۰۸۲	۰/۰۸۱	۰/۰۴۰
K-H*	۰/۱۹۵	۰/۱۳۲	۰/۱۰۳	۰/۰۶۸	۰/۰۸۱	۰/۰۸۱	۰/۰۷۱	۰/۰۷۲	۰/۰۷۴	۰/۰۸۳	۰/۰۹۲	۰/۱۱۵
K-H**	۰/۱۲۸	۰/۰۸۷	۰/۰۹۷	۰/۰۶۴	۰/۰۸۰	۰/۰۷۱	۰/۰۶۱	۰/۰۷۴	۰/۰۷۴	۰/۰۵۲	۰/۰۷۷	۰/۰۶۳

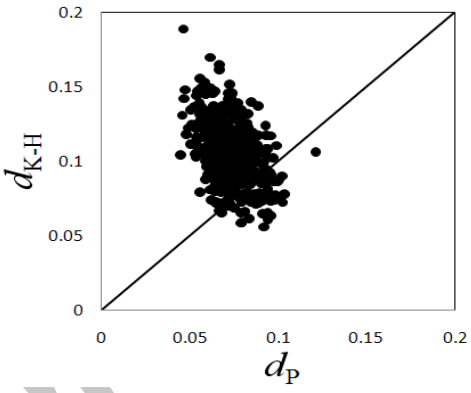
* زمانی‌که برای تمامی کلاس‌ها یک منحنی مرجع در نظر گرفته شود. ** زمانی که برای هر کلاس یک منحنی مرجع درنظر گرفته شود.

برای بررسی پایداری نتایج به‌دست آمده از روش پیشنهادی در برخورد با انتخاب تصادفی نمونه‌های خاک، به‌صورت تصادفی ۵۰۰ بار و هر بار ۲۰ نمونه از کلّ ۴۸۷ نمونه خاک انتخاب و تحلیل مقیاس‌بندی منحنی رطوبتی با روش‌های K-H و پیشنهادی انجام شد. مقادیر میانگین d به‌دست آمده از دو روش برای این ۵۰۰ بار در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. میانگین این مقادیر برای روش‌های K-H و پیشنهادی به‌ترتیب برابر با ۰/۱۰۶ و ۰/۰۷۴ و ضریب تغییرات آن‌ها به‌ترتیب برابر ۰/۱۹۵ و ۰/۱۵۶ است. این نتایج نشان می‌دهد که

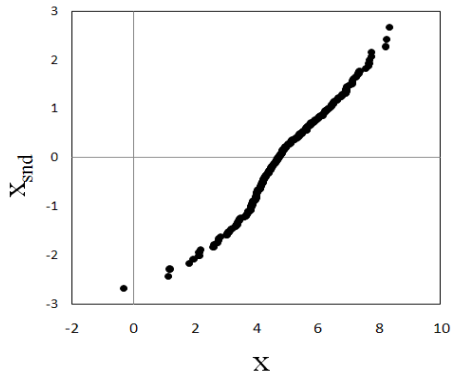
Archive of SID

www.SID.ir

پایداری در نتایج روش پیشنهادی حدوداً ۳۰ درصد بیش‌تر است. به بیان دیگر جدای از این‌که به لحاظ منطقی احتمال دارد که نتایج بطور نظام‌مند با ویژگی-هایی از نمونه‌های انتخابی بستگی داشته باشند، اتخاذ تصادفی نمونه‌ها نیز نشان می‌دهد که در روش پیشنهادی نه تنها خطای روش مقیاس‌بندی بلکه ضریب تغییرات آن نیز کم‌تر است.



شکل ۵- مقادیر میانگین d به‌دست آمده از دو روش کوزوگی و هاپمنز (d_{K-H}) و پیشنهادی (d_P) برای ۵۰۰ بار انتخاب تصادفی ۲۰ نمونه از کلّ ۴۸۷ نمونه خاک



شکل۶- دیاگرام فراکتایل لگاریتم فاکتورهای مقیاس $(h_{mean}-h_b)$. x بیانگر $\ln(h_{mean}-h_b)$ و xsnd مقدار متناظر با x از توزیع نرمال استاندارد می‌باشد.

شکل ۶ دیاگرام فراکتایل لگاریتم فاکتورهای مقیاس $(h_{mean}-h_b)$ را نشان می‌دهد. رفتار تقریباً خطی داده-ها در این دیاگرام نشان می‌دهد که مقادیر $\ln(h_{mean}-h_b)$ از توزیع نرمال و به‌عبارت دیگر مقادیر $h_{mean}-h_b$ به‌عنوان فاکتورهای مقیاس ارایه شده در این پژوهش، از توزیع لوگ- نرمال پیروی می-کنند. این نتیجه با نتایجی که پژوهش‌گران پیشین بدست آورده‌اند (واریک و همکاران، ۱۹۷۷، کوزوگی و هاپمنز، ۱۹۹۸) مبتنی است و مبنی بر لوگ- نرمال بودن توزیع فاکتورهای مقیاس هم‌خوانی دارد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی جدید برای مقیاس‌بندی منحنی رطوبتی خاک پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی کاستی روش‌های پیشین مبنی بر لزوم شرط تشابه خاک‌ها را برطرف کرده و برای خاک‌های غیرمتشابه نیز پیشنهاد می‌شود. در نتیجه برای مقیاس‌بندی در این روش، نیازی به کلاس‌بندی داده‌ها نبوده و مقیاس‌بندی را می‌توان برای گستره‌ی وسیعی از خاک‌ها به‌کار برد. همچنین در روش پیشنهادی، بر خلاف روش‌های پیشین، منحنی مرجع ثابت و مستقل از داده‌هایی است که در مقیاس‌بندی دخیل هستند.

تنها کاستی روش پیشنهادی در چگونگی برازش مدل استفاده شده (معادله‌ی ۱۰) برای منحنی رطوبتی است. این بدین معناست که اگر منحنی رطوبتی خاکی دقیقاً از معادله‌ی ۱۰ پیروی کند، منحنی رطوبتی مقیاس شده نیز دقیقاً بر روی منحنی مرجع قرار خواهد گرفت. بنابراین، اگر بتوان با حفظ قابلیت‌های روش پیشنهادی، جایگزینی بهتر برای معادله‌ی ۱۰ یافت، کارایی این روش تا حد زیادی افزایش می‌یابد.

منابع

۱- صادقی م. گهردوست منفرد م. ر. و قهرمان ب. ۱۳۸۷. مقیاس‌سازی تابع هدایت هیدرولیکی خاک با استفاده از عامل مویینگی مؤثر. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۴(۱):۱۸۹-۱۹۷.

۲- صادقی م. و قهرمان ب. ۱۳۸۷. مقیاس‌سازی توامان منحنی رطوبتی و تابع هدایت هیدرولیکی خاک. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۴(۲):۳۹۶-۴۰۶.

3- Brooks R.H., and Corey A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrological Paper no. 3. Colorado State University, Fort Collins.

Archive of SID

www.SID.ir

4- Das B.S. Haws W.N. and Rao P.S.C. 2005. Defining geometric similarity in soils. Vadose Zone Journal. 4:264-270.
5- Kosugi K. 1994. Three parameter lognormal distribution model for soil water retention. Water Resources Research. 30(4):891-901.
6- Kosugi K. 1996. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. Water Resources Research. 32(9):269-2703.
7- Kosugi K. and Hopmans J.W. 1998. Scaling water retention curves for soils with lognormal pore-size distribution. Soil Science Society of America Journal. 62:1496-1504.
8- Leij F.J. Alves W.J. Van Genuchten M.Th. and Williams J.R. 1999. The UNSODA unsaturated soil hydraulic database. p. 1269-1281. In M.Th. van Genuchten et al. (ed.) Characterization and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media. Univ. of California, Riverside, CA.
9- Miller E.E. and Miller R.D. 1956. Physical theory for capillary flow phenomena. Journal of Applied Physics. 27:324-332.
10- Simmons C.S. Nielsen D.R. and Biggar J.W. 1979. Scaling of field-measured soil-water properties. Hilgardia. 47:77-173.
11- Tuli A. Kosugi K. and Hopmans J.W. 2001. Simultaneous scaling of soil water retention and unsaturated hydraulic conductivity functions assuming lognormal pore-size distribution. Advance in Water Resources. 24:677-688.
12- Vogel T. Cislerova M. and Hopmans J.W. 1991. Porous media with linearly hydraulic properties. Water Resources Research. 27:2735-2741.
13- Van Genuchten M.TH. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal. 44:892-898.
14- Warrick A.W. Mullen G.J. and Nielsen D.R. 1977. Scaling of field measured hydraulic properties using a similar media concept. Water Resources Research. 13(2):355-362.

Archive of SID

www.SID.ir