

توسعه یک مدل فیزیکی برای برآورد منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک و مقایسه آن با روش‌های رایج

اسما فتحی نژاد^۱، محمدحسین محمدی^۲^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران^۲ دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

چکیده

در این پژوهش ابتدا یک مدل فیزیکی برای تبیین توزیع اندازه منافذ خاک و در نتیجه منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک توسعه داده شد و سپس برای لحاظ کردن تاثیر اعوجاج مجاری خاک ۴ مدل اعوجاج با مدل توسعه داده شده تلفیق شد و نتایج آن با نتایج مدل‌های رایج برآورد کننده منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک شامل مدل‌های بروکز کوری-معلم و بروکز کوری-بردین و ونگنوختن-معلم و ونگنوختن-بردین مقایسه شد. برای این منظور ویژگی‌های هیدرولیکی مکش ماتریک خاک و هدایت هیدرولیکی خاک از بانک اطلاعاتی UNSODA استخراج و سپس پارامترهای منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیراشباع با استفاده از نرم افزار RETC به دست آمد. نتایج نشان داد که مدل فیزیکی توسعه داده شده زمانی که با مدل اعوجاج مارشال تلفیق می‌شود نتایج بهتری را نسبت به سایر مدل‌ها برآورد می‌کند. بین مدل‌های رایج نیز مدل ونگنوختن-معلم بهترین برآورد را داشت. برخلاف مدل‌های رایج، مدل فیزیکی نیاز به هیچ پارامتر تجربی ندارد صرف نظر از خطای نسبتاً بیشتری که دارد می‌تواند قابلیت تعمیم بیشتری را داشته باشد و در مواردی که اطلاعات کمی در دسترس است و یا منحنی رطوبتی خاک وجود ندارد مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: ضریب اعوجاج، هدایت هیدرولیکی غیراشباع، مدل فیزیکی

مقدمه

ناحیه غیراشباع خاک یکی از قسمت‌های پراهمیت و اصلی در چرخه هیدرولوژی هستند (مالکی و همکاران^۱ ۱۳۹۱). در سال‌های اخیر به علت کم‌آبی و نیاز به محصولات بیشتر و آلودگی‌ها بررسی هدایت هیدرولیکی غیراشباع بیشتر مورد تاکید است. هدایت هیدرولیکی غیراشباع همواره برای بررسی توانایی ذاتی خاک در انتقال آب که برای مدل‌سازی حرکت آب و املاح مورد استفاده قرار می‌گیرد اهمیت دارد (Foley و همکاران^۲ ۲۰۰۶). در برآورد تعادل آب در خاک و رشد محصول و مدل‌سازی فرسایش خاک و اصلاح خاک‌های شور نیز از منحنی هدایت هیدرولیکی استفاده می‌شود (Verbist و همکاران^۳ ۲۰۰۹). اندازه‌گیری منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک بسیار دشوار و پرهزینه است. به همین دلیل غالباً از روش‌های غیرمستقیم برآورد می‌شود. تخمین هدایت هیدرولیکی غیراشباع غالباً با استفاده از منحنی رطوبتی خاک (SWC) انجام می‌شود (مالکی و همکاران، ۱۳۹۱ و Hillel, 1998). با توجه به ضرورت هدایت هیدرولیکی غیراشباع و پیچیدگی این موضوع از برخی مدل‌های برآورد کننده استفاده می‌شود. برای بهره‌گیری از این مدل‌ها باید از روابط هیدرولیکی غیراشباع و یا منحنی رطوبتی خاک آگاهی داشت (کشکولی و زینال زاده^۴ ۱۳۸۰). بسیاری از پارامترهای این مدل‌ها تجربی بوده و به داده‌ها و اطلاعاتی که در استنتاج آن‌ها استفاده شده است بستگی دارند. این پارامترها می‌توانند برای همه شرایط و خاک‌ها الزاماً صادق نباشند. هدف از این مطالعه بسط و توسعه یک مدل ساده فیزیکی منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع و مقایسه نتایج آن با داده‌های تجربی و مدل‌های رایج شامل مدل‌های بروکز کوری-معلم و بروکز کوری-بردین و ونگنوختن-معلم و ونگنوختن-بردین است.

مواد و روش‌ها

اگر فرض شود منافذ خاک به شکل لوله‌های مستقیم با شعاع r هستند با استفاده از قانون پوازوی مقدار دبی برای یک لوله با شعاع r_i به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = \frac{\pi \Delta P r^4}{8 \eta L} \quad (1)$$

که در آن ΔP اختلاف فشار دو سر لوله (dyne.cm^{-2}) شعاع لوله (cm)، L طول لوله (cm) و η گرانیوی سیال ($\frac{\text{poise.cm}^2}{\text{sec}}$) است.

فرض می‌شود تمام منافذ خاک به اندازه‌های مشخص قابل دسته بندی است. اندازه منافذ خاک از r_1 تا $r_n \dots r_1$ تقسیم بندی می‌شوند. اگر n_1 عدد از منافذ r_1 و n_2 عدد از منافذ r_2 و... در خاک وجود داشته باشد، آنگاه دبی کل منافذ خاک از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است.

$$Qt = \sum_{i=1}^n Q_i = \frac{\pi}{8\eta} \times \frac{\Delta P}{L} \times \sum n_i \times \pi r_i^2 \times r_i^2 \quad (2)$$

که در آن؛ $n_i \times \pi r_i^2$: سطح مقطع منافذ با شعاع r_i در خاک است که با تقسیم بر سطح کل خاک مقدار رطوبتی (θ_i) که این منافذ در خود نگه می‌دارند به دست می‌آید. اگر شیب هیدرولیکی واحد فرض شود:

$$\frac{\Delta P}{L} = 1$$

آنگاه:

$$K(\theta) = \frac{Qt}{A_s} \quad (3)$$

A_s : سطح مقطع خاک است.

تلفیق روابط (۲) و (۳) رابطه (۴) را حاصل می‌کند:

$$K(\theta) = \frac{1}{8\eta} \sum (r_i^2 \times \theta_i) \quad (4)$$

چون منافذ خاک مستقیم نیستند عامل پیچ و پیچی منافذ (τ) در آن ضرب میشود:

$$K(\theta) = \frac{1}{8\eta} \sum_{i=1}^{i=j} (r_i^2 \times \theta_i) \tau \quad (5)$$

که در آن؛ r_i ؛ اندازه بزرگترین منفذ هادی آب است. هدایت هیدرولیکی نسبی (Kr) از رابطه زیر محاسبه شد.

$$Kr = \frac{\frac{1}{8\eta} \sum_{i=1}^{i=j} (r_i^2 \times \theta_i) \tau}{\frac{1}{8\eta} \sum_{i=1}^{i=n} (r_i^2 \times \theta_i) \tau} \quad (6)$$

$$K(h) = \frac{\sum (r_i^2 \times \theta_i) \tau}{Ks} \quad (7)$$

Ks هدایت هیدرولیکی اشباع (m/sec) و τ عامل پیچ و پیچی منافذ (r_i) است. برای برآورد ضریب اعوجاج از مدل‌های زیر استفاده شد.

$$\tau = \theta_s^{\frac{4}{3}} \quad (8) \text{ (Millington, 1959)}$$

$$\tau = \theta_s^{1.5} \quad (9) \text{ (Marshall, 1958)}$$

$$\tau = \frac{\theta_s^{\frac{7}{3}}}{\theta_s^2} \quad (10) \text{ (Lai و همکاران 1976)}$$

$$\tau = \frac{\theta_s^{\frac{10}{3}}}{\theta_s^2} \quad (11) \text{ (Millington and Quirk, 1961)}$$

که در آن؛ θ رطوبت خاک ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) و θ_s رطوبت اشباع ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) است.

در این تحقیق از بانک اطلاعاتی UNSODA منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی ۱۲ خاک استخراج شد. لیست خاک‌های مورد استفاده و برخی ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱- لیست خاک‌های استفاده شده از بانک اطلاعاتی UNSODA و برخی ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها

کد خاک	n	M	Θ_r	α	Ks	Θ_s بافت
۳۳۷۰	۱/۳۲۷	۰	۰	۰/۰۰۹۸	۳۵	۰/۴۴
۱۳۶۰	۱/۴۱۴	۰/۰۷۶	۰	۰/۰۰۴	۱/۷	۰/۴۴
۲۲۲۰	۴/۵۵۱	۰/۶۷۱	۰/۰۷۱	۰/۰۱۲	۶۰/۴۲	۰/۳۲
۳۳۷۰	۱/۰۰۵	۰/۱۲۳	۰/۰۸۶	۵/۴۴	۴۹۷۰	۰/۵۲
۴۰۰۰	۱/۱۹	۰/۱۵۹	۰	۰/۰۳۰۶	۲۱۷/۵۱	۰/۳۹
۴۱۰۱	۱/۰۰۵	۰/۱۶۵	۰/۰۷۹	۰/۰۸۴	۱۲/۴	۰/۴۳
۴۱۰۲	۱/۰۰۵	۰/۰۸۶	۰	۰/۳۱۲	۷۲/۹	۰/۴۲
۴۱۱۰	۱/۰۰۵	۰/۲۳۸	۰	۰/۰۰۸۶	۶۸۷/۷	۰/۴۳
۴۱۲۰	۴/۸۸	۰/۷۹۵	۰	۰/۶۱۹	۲۶۸۸	۰/۵۲
۴۱۵۲	۱/۰۸	۰/۰۷۴	۰	۰/۰۲۴	۵۱۶/۷	۰/۳۴
۴۱۸۶	۲/۷	۰/۶۲۹	۰	۱/۰۶	۱۷۴۵/۲	۰/۵۷
۴۶۸۰	۱/۶	۰/۳۷۵	۰	۱/۵۳	۸۲۴۸/۱	۰/۵۵

با استفاده از نرم افزار RETC مدل‌های بروکز کوری معلم و بروکز کوری بردین و ونگنوختن معلم و ونگنوختن بردین بر داده‌های تجربی برازش داده شد.

مدل ونگنوختن - معلم:

$$K(\theta) = K_s \times Se^{\frac{1}{2}} \times \left(1 - \left(1 - Se^{\frac{1}{m}}\right)^m\right)^2 \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (12)$$

مدل ونگنوختن - بردین:

$$K(\theta) = K_s * Se^2 \times \left(1 - \left(1 - Se^{\frac{1}{m}}\right)^m\right) \quad m = 1 - \frac{2}{n} \quad (13)$$

مدل بروکز کوری - معلم:

$$K(\theta) = K_s \times Se^{\frac{5}{2} + \frac{2}{n}} \quad (14)$$

مدل بروکز کوری - بردین:

$$K(\theta) = K_s \times Se^{3 + \frac{2}{n}} \quad (15)$$

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (16)$$

که در آن؛ h مکش ماتریک خاک (cm) Θ_r رطوبت باقیمانده (cm³.cm⁻³) است. m، n، α ضرایب تجربی هستند که از برازش به دست می‌آیند. مقدار خطا با استفاده از رابطه (۱۷) محاسبه شد.

(۱۷)

$$RMSE = \sqrt{\frac{[\sum \log(K(h_1)) - \log(K(h_2))]^2}{N}}$$

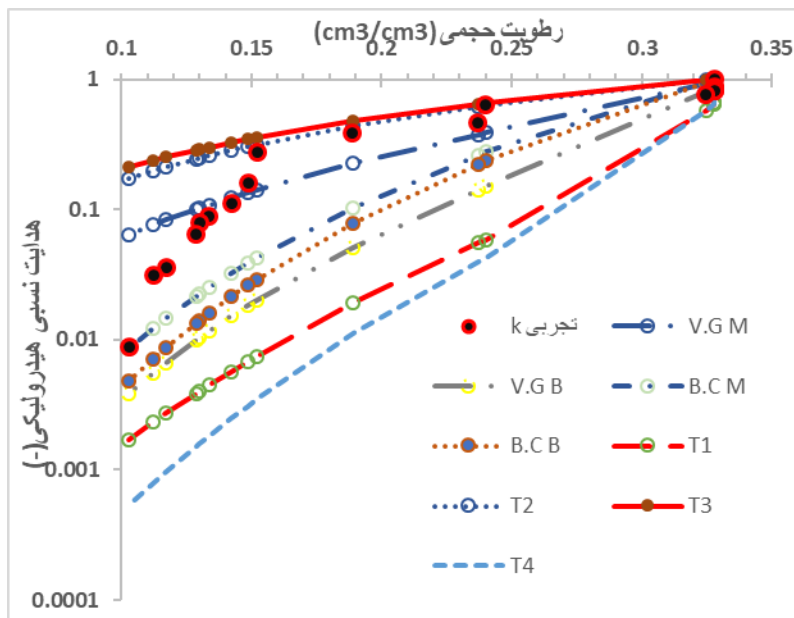
که در آن؛ K(h₂) مقدار هدایت هیدرولیکی نسبی محاسبه شده و K(h₁) مقدار هدایت هیدرولیکی نسبی تجربی و N تعداد نقاط است.

نتایج و بحث

مقدار خطای برآورد هر یک از مدل‌ها بر اساس RMSE در جدول (۲) آمده است. بر اساس RMSE دقت مدل‌های مورد استفاده در برآورد منحنی $K(\theta)$ به ترتیب زیر است.

و نگوختن معلم < و نگوختن بردین < بروکز کوری بردین < بروکز کوری معلم در بین مدل‌های تبیین کننده اعوجاج نیز تلفیق معادله (Marshall, 1958) با مدل توسعه یافته رابطه (۶) بهترین برآورد را دارد.

شکل (۱) مثالی از برآورد منحنی هدایت هیدرولیکی توسط روش‌های مختلف مورد مطالعه در این تحقیق برای خاک شماره ۲۲۲۰ نشان می‌دهد. ارجحیت مدل و نگوختن معلم و دقت نسبی معادله (Marshall, 1958) در برآورد منحنی هدایت هیدرولیکی قابل مشاهده است.



شکل (۱) منحنی هدایت هیدرولیکی تجربی خاک شماره ۲۲۲۰ و منحنی‌های برآورد شده توسط روش‌های مختلف مورد مطالعه.

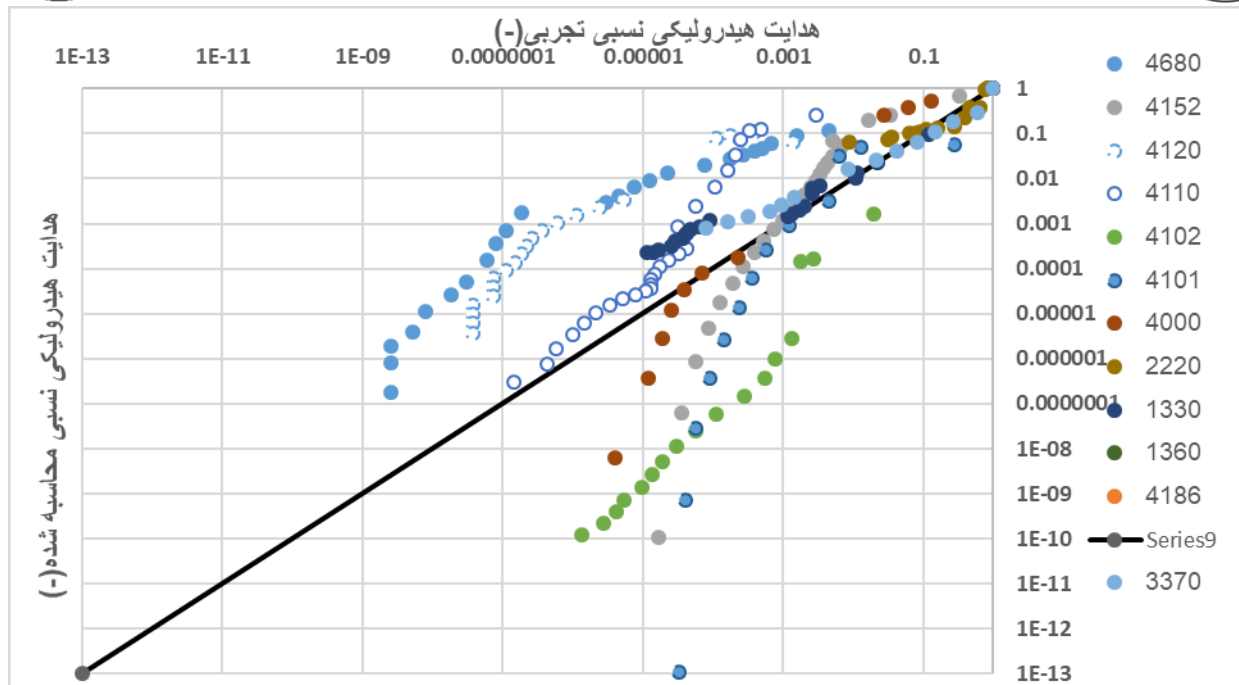
جدول شماره (۲). مقادیر RMSE (رابطه ۱۷) برای برآورد منحنی هدایت هیدرولیکی کلیه خاک‌های مندرج در جدول شماره (۱)

	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	VG-M	VG-B	BC-M	BC-B
۱۳۳۰	۴/۰۲۷	۳/۸۷۹	۳/۸۴۹	۴/۲۰۷	۰/۸۱۳	۰/۶۵۳	۱/۴۶۶	۱/۳۶۹
۱۳۶۰	۱/۶۹۵	۱/۷۰۹	۱/۷۱۲	۱/۶۷۸	۱/۵۳۸	۱/۳۰۲	۱/۴۵۸	۱/۴۵۱
۲۲۲۰	۰/۹۶۲	۰/۴۶۱	۰/۵۰۵	۱/۲۳۸	۰/۲۶۲	۰/۶۵۶	۰/۴۲۴	۰/۵۴۵
۳۳۶۰	۱۰/۴۳۱	۱/۵۱۳	۱/۴۱۶	۱/۰۱۰	۰/۴۵۲	۳/۰۵۳	۳/۰۲۹	۳/۱۶۷
۴۰۰۰	۳/۵۵۲	۳/۱۱۴	۰/۰۲۸	۴/۰۸۶	۱/۰۸۵	۰/۶۱۶	۱/۹۴۵	۰/۹۴۷
۴۱۰۱	۴/۴۷۷	۴/۲۷۸	۴/۲۳۸	۴/۷۱۷	۲/۸۹۵	۱/۲۹۸	۰/۵۹۲	۰/۶۵۰
۴۱۰۲	۳/۷۴۹	۳/۵۸۴	۳/۵۵۱	۳/۹۴۷	۳/۱۵۹	۱/۸۵۸	۱/۵۲۸	۱/۶۲۴
۴۱۱۰	۲/۷۹۴	۲/۵۷۸	۲/۵۳۹	۳/۰۰۹	۱/۲۷۱	۱/۳۸۷	۱/۹۱۷	۱/۸۴۳
۴۱۲۰	۱/۶۸۹	۱/۵۸۲	۱/۵۶۰	۱/۸۲۰	۲/۷۱۷	۲/۹۶۱	۴/۰۵۰	۳/۹۶۸
۴۱۵۲	۳/۳۹۱	۳/۰۱۹	۴/۱۵۰	۳/۸۴۵	۱/۳۳۳	۲/۱۱۶	۰/۸۹۰	۰/۸۵۶
۴۱۸۶	۰/۶۴۶	۰/۵۸۲	۰/۵۶۹	۰/۷۲۳	۲/۵۲۷	۱/۷۰۰۶	۳/۷۱۹	۳/۶۹۷
۴۶۸۰	۰/۴۳۲	۰/۴۸۹	۰/۵۰۱	۰/۳۷۹	۲/۷۲۴	۲/۹۵۲	۴/۰۰۷	۳/۹۷۳
میانگین	۳/۱۵۳	۲/۹۸۲	۳/۰۵۱	۳/۳۸۸	۱/۷۳۱	۱/۷۹۶	۲/۰۸۵	۲/۰۰۷

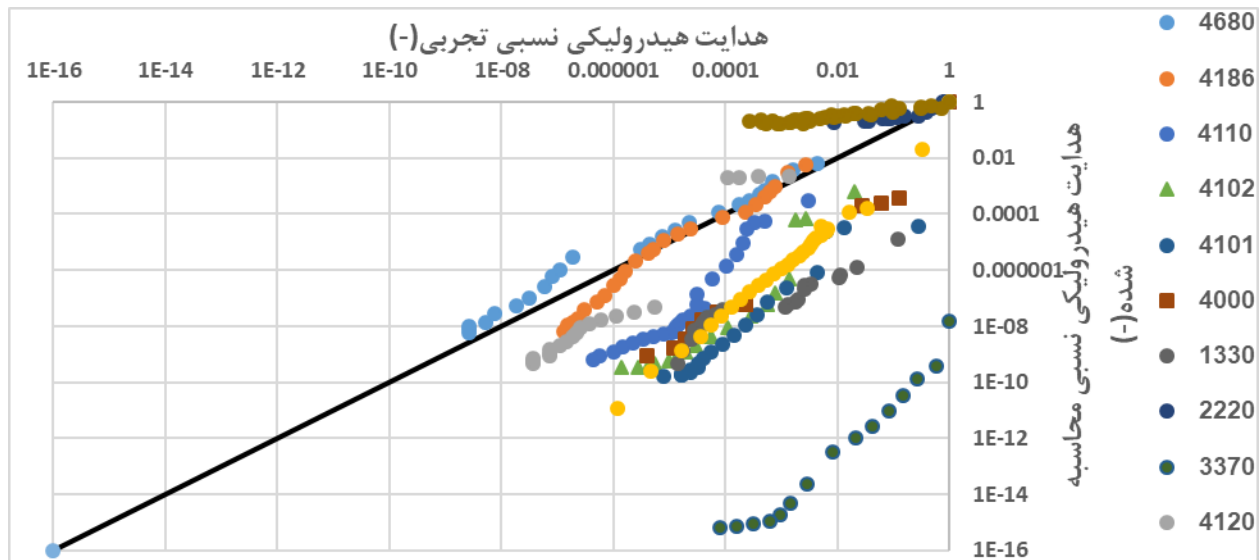
τ_1 : معادله (۸) τ_2 : معادله (۹) τ_3 : معادله (۱۰) τ_4 : معادله (۱۱)

VG-M: معادله (۱۲) VG-B: معادله (۱۳) BC-M: معادله (۱۴) BC-B: معادله (۱۵)

به طور کلی جدول (۲) نشان می‌دهد مدل‌های فیزیکی نسبت به مدل‌های نیمه فیزیکی دارای خطای بیشتری هستند و بنابراین از نظر دقت مدل‌های تجربی ترجیح داده می‌شوند. اما در عوض، مدل‌های فیزیکی به دلیل نداشتن پارامترهای تجربی قابل تعمیم به تمام خاک‌ها می‌باشند. شکل (۲) مقایسه بین $K(\theta)$ اندازه‌گیری شده و برآورد شده با استفاده از روش ونگنوختن معلم را برای کلیه خاک‌ها نشان می‌دهد. پراکندگی نسبتاً قابل قبول نقاط حول محور ۱:۱ موید دقت این مدل است. شکل (۳) نیز مقایسه بین $K(\theta)$ اندازه‌گیری شده و برآورد شده با استفاده از مدل فیزیکی تلفیق شده با مدل اعوجاج (Marshall, 1958) را برای کلیه خاک‌ها نشان می‌دهد. به صورت کلی می‌توان نتیجه گرفت دقت این مدل بجز برای خاک شماره ۳۳۷۰ برای سایر خاک‌ها قابل مقایسه با مدل ونگنوختن معلم است. صداقت و همکاران (۱۳۹۵) گزارش کردند که برآورد $K(\theta)$ با استفاده از مدل‌های فیزیکی می‌تواند دقت تخمین را در مقیاس‌های بزرگ بهبود ببخشد.



شکل (۲) مقایسه بین $K(\theta)$ اندازه‌گیری شده و برآورد شده با استفاده از روش ونگنوختن معلم را برای کلیه خاک‌های انتخاب شده. خط پیوسته سیاه محور ۱:۱ را نشان می‌دهد.



شکل (۳) مقایسه بین $K(\theta)$ اندازه‌گیری شده و برآورد شده با استفاده از روش (Marshall, 1958) را برای کلیه خاک‌های انتخاب شده. خط پیوسته سیاه محور ۱:۱ را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

مدل فیزیکی توسعه داده شده در اغلب موارد $K(\theta)$ را با دقت نسبتاً قابل قبولی برآورد می‌کند. هرچند قابلیت تعمیم این مدل به دلیل ذات فیزیکی آن بیشتر از مدل‌های تجربی است و نیاز به هیچ پارامتر اولیه تجربی ندارد، اما جهت تایید قابلیت‌های مختلف مدل، تعداد خاک‌های بیشتری با طیف وسیع‌تری از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی لازم است تا مدل پیشنهادی در آن‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. به نظر می‌رسد توسعه و یا استفاده از مدل فیزیکی $K(\theta)$ به درک برخی رفتارهای هیدرولیکی خاک و یا ساز و کار انتقال آب در مجاری و منافذ خاک کمک نماید. در مواردی که اطلاعات کمی در دسترس است و یا منحنی رطوبتی خاک وجود ندارد استفاده از این مدل می‌تواند کارگشا باشد.

منابع

- کشکولی، ح. و زینال زاده، ک. ۱۳۸۰. بررسی و ارزیابی مدل‌های رطوبتی و تخمین روابط هیدرولیکی غیراشباع، مجله علمی موسسه تحقیقات خاک و آب تهران
- مالکی، ن.، کشکولی، ح. و ظهراپی، ن. ۱۳۹۱. تعیین خصوصیات هیدرولیکی و منحنی رطوبتی تپه‌های ماسه‌ای از روی دانه بندی و مقایسه آن با سایر روش‌ها، همایش جامع مدیریت آب
- صداقت، آ.، بیات، ح. و صفری سنجانی، ع. ۱۳۹۵. رابطه بین ویژگی‌های مکانیکی و منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک‌ها، نشریه آب و خاک
- Foley, J. ., Tolmie PE. and Silburn DM. 2006. Improved measurement of conductivity on swelling clay soils using a modified disc permeameter method. *Soil Research* 44:701-710.
- Verbist, K. ., Baetens, J.M., Cornelis, W.M., Gabriels, D., Torres, C. and G. Soto. 2009. Hydraulic conductivity as influenced by stoniness in degraded dry lands of Chile. *Soil Science Society of America Journal*, 73:471-484
- van Genuch ten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:892-898
- Hillel, D. 1998. *Environmental soil physics*. Academic Press, NewYork, 541 pp
- Millington, R. J. 1959. Gas diffusion in porous media. *Science* 130, 100-2.
- Millington, R. J., and Quirk, J. P. 1961. Permeability of porous solids. *Trans. Faraday Soc.* 57, 1200-6.
- Marsall, T. J. 1958. A relation between permeability and size distribution of pores. *Journal of Soil Science*, 9(1), 1-8.
- Lai. S. H., Tiedje, J. M., Erickson, A. E. 1976. In situ measurement of gas diffusion coefficient in soils 1. *Soil Science Society of America Journal*, 40(1), 3-6.



16th Iranian Soil Science Congress

University of Zanjan, Iran, August 27-29, 2019



Topic for submission: New Technology in Soil Science

Abstract

A physical model was developed to explain the soil pore size distribution and then the partially-saturated hydraulic conductivity curve ($K(\theta)$). To consider the effect of soil pore tortuosity, 4 tortuosity models were combined with the developed model and the results were compared with the results of common models including the Brooks Corey-Mualem, Brooks Corey-Burdine, van Genuchten-Mualem, and van Genuchten-Burdine models. To evaluate the model, 12 soils were taken from the UNSODA database and the fitting parameters of water characteristics and partially saturated hydraulic conductivity curves were obtained using RETC software. The results showed that the developed model incorporated with the Marshall's tortuosity model, estimates soil properly the $K(\theta)$. Among the common models, the van Genuchten-Mualem model estimated the best results. Unlike common models, the physical model doesn't need any empirical parameters, so it can be upscaled for large media and can be used in cases with little available information.